

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีน-ทินออกไซด์
ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
สำหรับวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NICKEL
OXIDE/MULTIWALL CARBON NANOTUBE COMPOSITE
MODIFIED FLUORINE – DOPED TIN OXIDE ELECTRODE FOR
HYDROGEN PEROXIDE DETERMINATION**



T116942

บุญส่ง จันทรไธ

Boonsong Jandai

วพ.
21582
2554

สาขา.....
เลขทะเบียน.....116942
วันเดือนปี.....17 ส.ย. 2554

b.....1233120X
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-SC-M-012-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NICKEL
OXIDE/MULTIWALL CARBON NANOTUBE COMPOSITE
MODIFIED FLUORINE – DOPED TIN OXIDE ELECTRODE FOR
HYDROGEN PEROXIDE DETERMINATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2011

KMITL-2011-SC-M-012-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้า
ฟลูออรีน-ทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยวัสดุผสม
นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับ
วิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นักศึกษา

นายบุญส่ง จันทร์ไค

รหัสประจำตัว

51067803

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมี

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.วิญญู เพชรภา

บทคัดย่อ

ขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอาศัยการกระจายตัวของ
นิกเกิลออกไซด์บนมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แล้วเคลือบบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีน-ทินออกไซด์
(FTO) โดยใช้แนฟโธอันเป็นตัวเชื่อม การกำจัดสิ่งเจือปนในมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้
ความร้อนและกรดเข้มข้น หลังจากกำจัดสิ่งเจือปนในคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงผสมกับสารละลายนิ
เกิลอะซีเตต ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปรับ pH ให้มีสภาพเป็นเบสอ่อน (pH 8) ด้วยสารละลาย
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ นำไปตกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงตกตะกอน นำตะกอนที่ได้ไปเผา
ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาเคลือบบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์
โดยใช้สารละลายแนฟโธอันเป็นสารเชื่อม การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าที่
พัฒนานั้นใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่านิกเกิลออกไซด์กระจายตัวบนมัลติวอลล์คาร์บอน
นาโนทิวบ์อย่างสม่ำเสมอและมีอนุภาคใกล้เคียงกัน การทดสอบคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าด้วย
เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ซึ่งสามารถทดสอบคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น สำหรับการ
วิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยใช้ไฟฟ้า
ฟลูออรีน ทิน ออกไซด์ ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิลออกไซด์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น
ขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์หาช่วงความเข้มข้นในการตรวจวัดพบว่าอยู่ในช่วง ตั้งแต่ 0.1
มิลลิโมลาร์ ถึง 2.2 มิลลิโมลาร์ (ค่าความเป็นเส้นตรง $r^2 = 0.9996$) ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด
เท่ากับ 35.60 ไมโครโมลาร์ (S/N = 3) จากงานวิจัยนี้พบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมา
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อนำมา
ประยุกต์ใช้ในตัวอย่างน้ำยาล้างแผลและน้ำยาข้อมผมให้ค่าร้อยละของการได้กลับคืนเท่ากับ
105.50, 110.30, 105.00 และ 93.60 ตามลำดับ

คำสำคัญ : นิกเกิลออกไซด์, มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์,
แอมฟิออน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ไซคลิกโวลแทมเมตรี, แอมเพโรเมทรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Synthesis and Characterization of Nickel oxide/multiwall carbon nanotube composite modified Fluorine-doped Tin oxide electrode for Hydrogen peroxide determination

Student Boonsong Jandai

Student ID 51067803

Degree Master of Science

Program Chemistry

Year 2011

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Suwan Chaiyasith

Thesis Coadvisor Assoc.Prof.Dr.Wisanu Pecharapa

ABSTRACT

The new electrode for determination of hydrogen peroxide was developed based on cross-linking between Nickel oxide/multiwall carbon nanotubes (NiO/MWCNTs) and fluorine-doped tin oxide (FTO) using nafion as binder. The MWCNT was purified by classical oxidative with acid treatment. The purified MWCNTs was mixed with 0.2 M Nickel acetate and adjusted to pH 8 with ammonium hydroxide solution. The suspension of MWCNT was calcined to NiO/MWCNT at 400 °C for 2 hrs. The NiO/MWCNT and nafion was fabricated onto FTO electrode. The physical properties were investigated by Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and X-ray Diffractometer (XRD). The SEM result is indicated that NiO nanoparticles were well uniform and distributed on the surface of MWCNTs. The cyclic voltammetry were used to confirm the successful procedure synthesis of NiO/MWCNTs/FTO and the concentration of hydrogen peroxide was determined by amperometry, by mean of the NiO/MWCNTs/nafion/FTO as working electrode. The linear correlation between current and concentrations was achieved 1.0×10^{-4} to 2.2×10^{-3} mol dm⁻³ ($r^2=0.9987$). The detection limit of the electrode was found to be 45.81 μM based on signal-to-noise ratio of 3. Consequently the NiO/MWCNT/FTO can be probably useful as working electrode for the development of hydrogen

peroxide sensor. The percentage recovery of hydrogen peroxide in disinfectant medical and hair color product samples was 105.50, 110.30, 105.00 and 93.60 respectively.

Keywords: Nickel oxide, Multiwall carbon nanotube, Fluorine-doped Tin Oxide Electrode, Nafion, Hydrogen peroxide, Cyclic voltammetry, Amperometry.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ และ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น และ ผศ.ดร.วินัย นุตมากุล กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและแก้ไข พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่อนุเคราะห์สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษาชัยภูมิเขต 2 ผู้อำนวยการโรงเรียนบ้านพอกโนนหนองผือคำไผ่ใต้ อนุญาตให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและคณะครูทุกท่าน โรงเรียนบ้านพอกโนนหนองผือคำไผ่ใต้ ที่ให้ความเมตตาบริการงานแทนข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการตรวจสอบวิเคราะห์คุณลักษณะของขั้วไฟฟ้า

ขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านของสาขาวิชาเคมี ตลอดจนเพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาเคมี (เคมีวิเคราะห์) ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และพี่น้องญาติมิตรที่ให้ความรักให้การศึกษามา และให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา สำหรับประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุญส่ง จันทร์ไค

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นิกเกิล.....	4
2.2 นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide).....	5
2.2.1 การผลิต (Manufacturing).....	6
2.2.2 โครงสร้าง (Structure).....	6
2.2.3 การสังเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะของนิกเกิลออกไซด์.....	7
2.3 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Carbon print screen electrode)	7
2.4 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine - doped tin oxide electrode)	9
2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide).....	10
2.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbonnanotubes; CNTs)	11
2.6.1 ประวัติคาร์บอนนาโนทิวบ์	11
2.6.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	12
2.6.3 วิธีการสังเคราะห์	13
2.6.3.1 การเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD).....	13
2.6.3.2 อาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3.3 ระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)	15
2.6.4 คุณสมบัติและการประยุกต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	15
2.7 สารละลายเนฟฟิออน	17
2.8 หลักการทางเคมีไฟฟ้าทั่วไป	18
2.8.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย (Mass transfer)	19
2.8.1.1 ไมเกรชัน (Migration)	19
2.8.1.2 การแพร่ (Diffusion)	20
2.8.1.3 การพา (Convection)	21
2.8.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	22
2.9 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Analysis of electrochemistry)	23
2.9.1 อุปกรณ์และเครื่องมือการทำโวลแทมเมทรี	23
2.9.1.1 เซลล์โวลแทมเมทรี	23
2.9.1.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)	25
2.9.1.3 อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า	28
2.9.2 เทคนิคโวลแทมเมทรี	29
2.9.2.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry)	29
2.9.2.2 เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (Chronoamperometry)	33
2.10 ค่าทางสถิติที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์	35
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature)	39
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	47
3.1 สารเคมี	47
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน	48
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	48
3.4 วิธีทำการวิจัย	50
3.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์	50
3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน	51
3.4.3 การเตรียมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์	53
3.4.3.1 การสังกัวมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3.2 การเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	53
3.4.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	53
3.4.3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	53
3.4.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วย นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	54
3.4.4.1 ศึกษาลักษณะรูปร่างของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	54
3.4.4.2 ศึกษาลักษณะรูปร่างของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์บน ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	54
3.4.4.3 การศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วย เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	54
3.4.4.4 การศึกษารูปแบบ โครงสร้างผลึกของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ บนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	54
3.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมตรี	54
3.4.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้า ฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	55
3.4.6.1 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	55
3.4.6.2 การศึกษาผลของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	55
3.4.6.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของนิกเกิลอะซิเตรตในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	56
3.4.6.4 การศึกษาผลของ pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	56
3.4.6.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแแนฟฟิออนในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.6.6 การศึกษาผลของปริมาณของสารแขวนลอยคือนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	57
3.4.6.7 การศึกษาผลของการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	57
3.4.6.8 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	57
3.4.6.9 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	58
3.4.6.10 ศึกษาค่าการทำซ้ำ	58
3.4.6.11 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า	58
3.4.6.12 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	58
3.4.6.13 การวิเคราะห์ค่าการคืนกลับ	59
บทที่ 4 ผลการวิจัย	60
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วย นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	60
4.1.1 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60
4.1.2 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์	62
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาค นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	63
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วย นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	63
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาค นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	65
4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วย นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	65
4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	66
4.3.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้น นิกเกิลอะซีเตรตในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า เพื่อตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4 ผลการศึกษาผลของ pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	69
4.3.5 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมฟิออน ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	71
4.3.6 ผลการศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	73
4.3.7 การศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	74
4.3.8 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Linear range)	76
4.3.9 ขีดจำกัดการตรวจวัด	79
4.3.10 ศึกษาค่าการทำซ้ำ	80
4.3.11 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า	81
4.4 การประยุกต์ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง	83
4.5 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการวิจัย	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก	94
ภาคผนวก ข	98
ภาคผนวก ค	100
ภาคผนวก ง	102
ภาคผนวก จ	105
ภาคผนวก ฉ	107
ภาคผนวก ช	110
ประวัติผู้เขียน	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์ และทางเคมีที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	16
2.2 การประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	17
2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารละลายเนฟฟิออน.....	18
4.1 แสดงค่าต่างๆของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	82
ข.1 แสดงอัตราการผสมเพื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์.....	99
ง.1 แสดงค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าร้อยละของการกลับคืน.....	104
จ.1 ตารางแสดงค่าร้อยละของการกลับคืนกลับที่เป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC.....	106
ฉ.1 ตารางแสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้า ขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยทำการตรวจวัดสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	108
ช.1 ตารางแสดงการคำนวณค่าความเที่ยงในการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของแร่ निकเกิล.....	4
2.2 แร่ Busentie.....	5
2.3 แบบจำลอง โครงสร้างของ निकเกิลออกไซด์.....	6
2.4 ลักษณะ โดยทั่วไปของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรินที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	8
2.5 ลักษณะ โดยทั่วไปของทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	9
2.6 แสดง โครงสร้างโมเลกุลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	10
2.7 แสดง โครงสร้างโมเลกุลของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง.....	10
2.8 รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ.....	12
2.9 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่างๆ.....	13
2.10 กระบวนการตกตะกอน ไอเคมีเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	14
2.11 กระบวนการอาร์คซาร์จ.....	14
2.12 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์.....	15
2.13 โครงสร้างของแนฟฟิออน.....	17
2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน.....	20
2.15 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่.....	21
2.16 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา.....	21
2.17 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	
ก. กระบวนการฟาราเดอิก $\text{Red} \rightleftharpoons \text{OX} + e^-$	
ข. กระบวนการอัดประจุ (นอนฟาราเดอิก).....	22
2.18 โวลแทมโมแกรมของสารละลาย 0.1 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	
(a) สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวไปด้วยอากาศทำให้เห็นรูปคลื่น (Wave) ของออกซิเจน	
(b) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายบางส่วน	
(c) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายทั้งหมด.....	25
2.19 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าที่สามารถให้แกขั้วไฟฟ้าแพลทินัม คาร์บอน และเมอร์คิวรี	
ในอิเล็กโทรไลต์เกลือหนุชนิดต่าง ๆ.....	27
2.20 แสดงผังการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (1, 2 และ 3 แทน Op amp (Operational amplifier)).....	28
2.21 (ก) โวลแทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมทรี (ข) ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แสดงวิธีการหาความสูงพีค เมื่อ i_p, E_p คือ ความสูงและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน i_{pa}, E_{pa} คือ ความสูงกระแสและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามลำดับ.....31</p>
2.23	<p>โคร โนแอมเพอโร (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับระยะทางที่เวลาต่างๆ (c) กราฟแสดงกระแสที่อ่านได้.....33</p>
3.1	ขั้วไฟฟ้ากว้าง 0.5 เซนติเมตร.....50
3.2	ขั้วไฟฟ้ายาว 1.5 เซนติเมตร.....50
3.3	ขั้วไฟฟ้ายาว 0.5 เซนติเมตร สำหรับจุ่มสารละลาย.....50
3.4	ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....51
3.5	แสดงลักษณะชั้นต่างๆ ที่สกรีน.....52
4.1	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์.....60
4.2	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....61
4.3	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....61
4.4	กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์.....62
4.5	กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุง ด้วยนิกเกิลออกไซด์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....63
4.6	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วย แนนฟีออน มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นิกเกิลออกไซด์ และไซคลิก โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรด ความเข้มข้น 30 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที64</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์
ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และ ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของ
ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
เมื่อทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟต
บัฟเฟอร์ พีเอช 7 (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์)
อัตราการสแกน 50 mV/s.....65
- 4.8 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์
เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์มัลติ
วอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
เป็น 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัม ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติ
วอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ สแกน
ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl)
อัตราการสแกน 50 mV/s.....67
- 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์
ออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....67
- 4.10 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์
เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิลออกไซด์/
มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต
(Ni [CH₃COO]₂) เป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 โมลาร์ ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสม
นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์
สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl)
อัตราการสแกน 50 mV/s.....68
- 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต.....69
- 4.12 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอช
ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่พีเอช ต่างๆ ได้แก่ pH 6.0, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8,
7.0, 7.1, 7.2, 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิล
ออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00
โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....70
- 4.14 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออนในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0%.....71
- 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออนในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 %.....72
- 4.16 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 5, 10, 15 และ 20 ไมโครลิตร เมื่อกำหนดความเข้มข้นของแนฟฟิออนเท่ากับ 0.5 %73
- 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 5, 10, 15 และ 20 ไมโครลิตร.....74
- 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ ตำแหน่ง 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ในสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ พีเอช 6.8.....	76
4.20	แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์.....	77
4.21	แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์.....	77
4.22	เปรียบเทียบแอมเพอโรแกรมระหว่างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์กับขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ปรับปรุงด้วยนิเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์.....	77
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการ ตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์.....	78
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรง ของการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	79
4.25	กราฟแสดงค่ากระแสของการตรวจวัดซ้ำของการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	80
4.26	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในแต่ละรอบของการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ด้วย ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	81
4.27	กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิเกิลออกไซด์/ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 1.....	83
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ กระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 2.....	84
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ กระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 1.....	84
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ กระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 2.....	85
ค.1	พิกของนิกลอกออกไซด์/คาร์บอนนาโนทิวป์จากเทคนิค X-Ray Diffraction.....	101

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	แอมแปร์
A	พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (cm ²)
Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
C	ความเข้มข้นของสารในสารละลายบัลค์ (mol dm ⁻³)
CV	ไซคลิกโวลแทมเมทรี
MWCNTs	มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
FTO	ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์
FTO/MWCNT	ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
FTO/NiO/MWCNT	ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
LOD	ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ
LOQ	ค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ
mM	ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิโมลาร์
μM	ความเข้มข้นในหน่วยไมโครโมลาร์
μA	ไมโครแอมแปร์
mA	มิลลิแอมแปร์
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
RSD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
V	โวลต์
V	อัตราการสแกน (mV/s) หรือ (V/s)
s	วินาที
%	เปอร์เซ็นต์
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm ² /s)
I _p	ค่ากระแสฟิสิก
C.E	ขั้วไฟฟ้าช่วย
W.E	ขั้วไฟฟ้าใช้งาน
R.E	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

XRD

เครื่องมือวัดค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารประกอบที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรม เช่น การฟอกย้อมเสื้อผ้า เครื่องหนัง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมทำความสะอาด ด้านการแพทย์ ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำ แทนคลอรีน และทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับว่าเป็นสารประกอบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์เพื่อตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้สอดคล้องและนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งตัวอย่างของการใช้การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เช่น ด้านการแพทย์ จะทำการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อคัดกรองผู้ป่วยที่ติดเชื้อและอักเสบเรื้อรัง ตั้งแต่โรคมะเร็ง อัลไซเมอร์ จนถึงโรคหัวใจและโรคไขข้ออักเสบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากสำหรับการรักษาคนไข้ได้ทันเวลาที่[1] การตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในเลือดโดยใช้เอนไซม์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงทำการวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นซึ่งปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่วัดได้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของปริมาณน้ำตาลในเลือด ซึ่งมีประโยชน์มากในการคัดกรองผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน[2] ส่วนในงานด้านสิ่งแวดล้อม[3] เช่น การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฝน และน้ำทะเล เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีผลโดยตรงกับร่างกายของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งถ้ามนุษย์ได้รับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในร่างกายในปริมาณที่มากอาจถึงแก่ชีวิตได้ สำหรับด้านอุตสาหกรรม จะมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งใช้ในกระบวนการฟอกขาว โดยต้องควบคุมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ให้มากหรือน้อยเกินไป และในอุตสาหกรรมอาหาร จะใช้ในการตรวจเชื้อจุลินทรีย์ในนมและโยเกิร์ต และในทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ใช้ในการล้างแผ่นซิลิกอน เป็นต้น จากตัวอย่างที่กล่าวมา จะพบว่า การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสำคัญจึงเกิดความสนใจที่จะพัฒนารูปแบบของเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะมีเทคนิคในการวิเคราะห์ได้หลายวิธี ทั้งการใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)[4-9] เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) [10-15] และ Chemiluminescence[15-16] ซึ่งการตรวจวัดปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า จะอาศัยการวัดกระแสของไฟฟ้า ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เมื่อมีการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมให้แก่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามักจะประสบปัญหาในการตรวจวัดคือ มีสารแทรกสอดบางชนิดรวมอยู่ในสารละลายที่ต้องการตรวจวัดสามารถเกิดออกซิไดซ์ ภายใต้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขั้วไฟฟ้า ทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการตรวจวัดหาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยปัจจุบันนี้ได้มีการใช้วิธีที่หลากหลายในการปรับปรุงประสิทธิภาพขั้วไฟฟ้า เช่น เทคนิคโซล-เจล[17] เทคนิคการเกาะติดทางไฟฟ้า (Electrodeposition)[18] Self-assembly[19] และการตรึงสารชีวภาพลงบนขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Immobilize) นอกจากนี้ในปัจจุบันสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิดได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางเชื่อมในการปรับปรุงหน้าขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากให้สัญญาณต่อกระแสที่วัดได้สูง ผลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือและยอมรับได้ ซึ่งวัสดุที่นำมาปรับแต่งผิวหน้าขั้วอิเล็กโทรดนั้นจะใช้อุณหภูมิกำหนดจำพวกแมงกานีสออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ เป็นต้น โดยงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์อนุภาคนิกเกิลออกไซด์/ซีเลสทิน บลูและโรโอซิน ปรับแต่งผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนด้วยเทคนิคการเกาะติดทางไฟฟ้า สามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งให้สัญญาณตอบสนองต่อการตรวจวัดที่สูง[20] และการสังเคราะห์อนุภาคนิกเกิลออกไซด์ ปรับแต่งผิวหน้าขั้วไฟฟ้าคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ให้สัญญาณตอบสนองต่อการตรวจวัดกลูโคสที่สูง[21] ซึ่งจะเห็นว่ายังไม่มีการนำอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ไปปรับแต่งผิวหน้าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine-doped tin oxide : FTO)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ และการทดสอบคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ปรับแต่งด้วยอนุภาคนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สำหรับวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
2. ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น
3. นำขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน
2. สังเคราะห์อนุภาคนาโนของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
3. เตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยอนุภาคนาโนของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
4. ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
5. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ทำการปรับแต่งแล้วด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมเพอโรเมตรี ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยสามารถใช้ปริมาณสารที่น้อย
2. ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ทำการปรับแต่งด้วยอนุภาคนาโนของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นมีสัญญาณในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากกว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ไม่ทำการปรับแต่งและใช้ศักย์ไฟฟ้าในการตรวจวัดลดลง
3. เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาและพัฒนาการสร้างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิกเกิล (Nickel) [22]

นิกเกิล (อังกฤษ: Nickel) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 28 และสัญลักษณ์คือ Ni อยู่ในตารางธาตุหมู่ 8B นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีชาวเงิน มีคุณสมบัติในการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่ต่ำแต่มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและทนต่อความร้อนสูงแร่นิกเกิลถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2294 ในประเทศรัสเซีย ประเทศที่ทำการผลิตแร่นิกเกิลรายใหญ่ของโลกในปัจจุบันได้แก่ รัสเซีย แคนาดา ออสเตรเลีย และอินโดนีเซีย จีน ฟิลิปปินส์ และทางตอนเหนือของประเทศพม่า ในปี 2542 ผู้บริโภคนิกเกิลรายใหญ่ของโลก ได้แก่ กลุ่มประเทศในทวีปยุโรป และทวีปเอเชีย มันอยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแต่ตีเป็นแผ่นได้ ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนู (arsenic) จะเกิดเป็นแร่นิกกอลไลท์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ์ (nickel glance)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของแร่นิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของนิกเกิล

1. สแตนเลสสตีล และอัลลอยด์กันสนิมชนิดต่างๆ กว่า 65% ของการใช้นิกเกิลในโลก ตะวันตกนั้นเป็นการใช้ทำสแตนเลสสตีล 13% ใช้ในการทำซูเปอร์อัลลอยด์ และอีก 24% เป็นการใช้ทำโลหะอัลลอยด์ และใช้ประโยชน์อื่น
2. ทำเกราะ และ burglar-proof vaults
3. เป็นส่วนผสมของโลหะ Alnico เพื่อใช้ในการทำแม่เหล็ก
4. Monel metal ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล มีคุณสมบัติป้องกันการผุกร่อนได้ดีเยี่ยม นำไปใช้ในการผลิตใบพัดเรือ เครื่องจักร และท่อในอุตสาหกรรมเคมี
5. ผลิต shape memory alloys ซึ่งใช้ในการหุ่นยนต์บางชนิด
6. ถ่านชาร์จ เช่น ถ่านนิกเกิลเมทัลไฮดรไรด์ (nickel metal hydride) และ ถ่านแบบนิกเกิลแคดเมียม (nickel cadmium) เป็นต้น
7. ทำเหรียญกษาปณ์ โดยในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา ใช้นิกเกิลเป็นส่วนผสมในการผลิตเหรียญ 5 เซ็นต์
8. เคลือบโลหะ (electroplating) เพื่อป้องกันสนิม

2.2 นิกเกิลออกไซด์ [24]

นิกเกิล (II) ออกไซด์ (NiO) เป็นสารเคมี ซึ่งเป็นโลหะออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง นิกเกิลออกไซด์ถูกค้นพบครั้งแรกในรูปของแร่ Bunsenite นิกเกิลออกไซด์จัดว่าเป็นโลหะออกไซด์พื้นฐานที่มีการผลิตโดยอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ใช้ประโยชน์จากนิกเกิลออกไซด์คือ อุตสาหกรรมโลหะผสมนิกเกิล



รูปที่ 2.2 แร่ Bunsenite

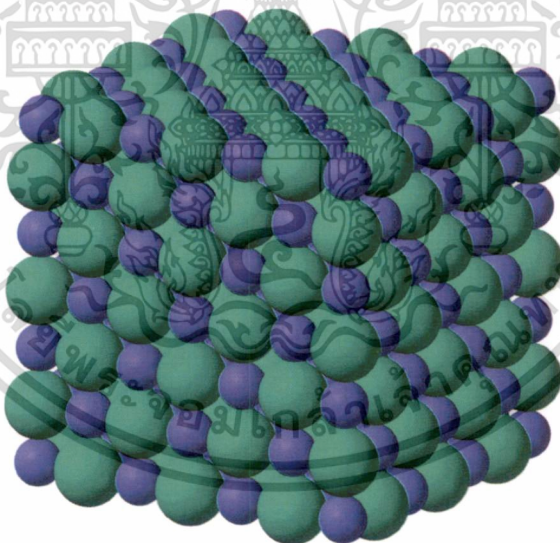
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การผลิต

นิกเกิลออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 400 °C ซึ่งผงนิกเกิลสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็นนิกเกิลออกไซด์ ในทางการค้าที่ต้องการผลิตนิกเกิลออกไซด์สีเขียวจะทำโดยนำนิกเกิลมาผ่านความร้อนที่ 1000 °C ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้สามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่ม นิกเกิลออกไซด์ วิธีที่ง่ายที่สุดและให้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดคือการเตรียมผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของสารประกอบนิกเกิล (II) เช่น ไฮดรอกไซด์ ไนเตรท คาร์บอเนต ซึ่งจะได้อัตลักษณ์ที่เป็นผงสีเขียว

2.2.2 โครงสร้าง

นิกเกิล ออกไซด์มีลักษณะ โครงสร้างเดียวกันกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ คือ มีลักษณะเป็นทรงแปดหน้า (Octahedral) ซึ่งเป็นโครงสร้างของโลหะออกไซด์ทั่วไป โดยปกติแล้วสารประกอบนิกเกิลออกไซด์จะมีอัตราส่วนระหว่าง Ni:O ที่ไม่คงที่จึงทำให้สีของนิกเกิลออกไซด์มีสีที่ต่างกันไปเช่นสีเขียว สีดำ สีเทา เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของนิกเกิลออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การสังเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะของนิกเกิลออกไซด์ [25]

นิกเกิลออกไซด์ที่มีความเป็นผลึกสูง มีขนาดอนุภาคผลึกในระดับนาโนเมตร มีรูพรุนในระดับเมโซพอร์ (2-50 นาโนเมตร) และมีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนในช่วงเดียวซึ่งเป็นช่วงที่แคบมาก ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกด้วยกระบวนการโซล-เจล ควบคู่กับการใช้สารลดแรงดึงผิวเป็นสารต้นแบบสำหรับทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและเกิดภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง นิกเกิลออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคผลึกในระดับนาโนเมตรนี้ถูกสังเคราะห์ผ่านการควบคุมการไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันของนิกเกิลเมธอกซีโพรพิเลทที่ถูกปรับแต่ง โครงสร้างโมเลกุลด้วยอะซิโตนอะซิโตน กับสารละลายลอร์เอมีนไฮโดรคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารลดแรงดึงผิวต้นแบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย นิกเกิลออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ Thermogravimetry and Differential Thermal Analysis (TG-DTA), X-Ray Diffraction Analysis (XRD), N₂ Absorption-Desorption Analysis, BET Surface Area Analysis, BJH Pore Size Distribution Analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), และ Selected-Area Electron Diffraction (SAED)

2.3 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Carbon print screen electrode) [26 - 28]

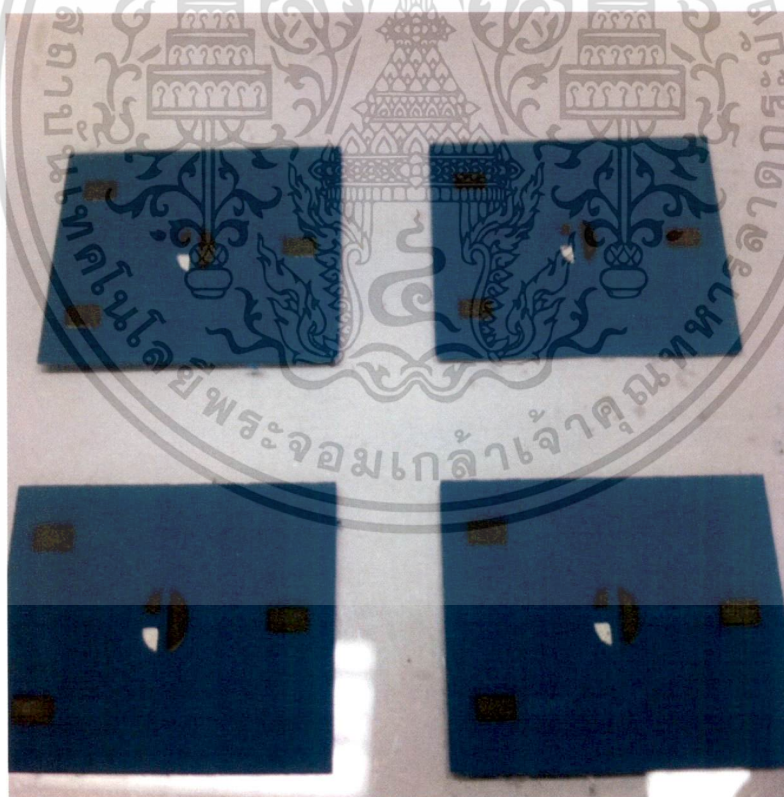
ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์สาร โดยมีลักษณะคล้ายกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปคือ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสามขั้ว ได้แก่ ขั้วทำงาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) และขั้วอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งใช้ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิงใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีนลงบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นผิวเรียบ เช่น กระดาษ เซรามิกส์ หรือแผ่นพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการพิมพ์สกรีนทำให้สามารถผลิตขั้วไฟฟ้าได้ที่ละมากๆ พร้อมๆ กันได้

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามารถนำมาทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณสมบัติได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดสารต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาการใช้งานปรับปรุงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน เพื่อใช้งานทางด้านต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยมีการปรับแต่งขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วยวิธีต่างๆ เช่น การผสมสารที่ต้องการปรับปรุงลงไปที่มีสกรีนโดยตรงหรือการใช้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ที่ต้องการเคลือบไว้บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนจะถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กและเพื่อให้ใช้แบบได้ครั้งเดียวแล้วทิ้งหรือใช้กับเครื่องมือแบบพกพาได้โดยการเสียบแล้วใช้งานได้ทันที

ข้อดีขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

1. ช่วยลดการปนเปื้อนจากการรบกวนของสารตัวอย่างที่วัดก่อนหน้านี้ เนื่องจากเป็นขั้วชนิดใช้แล้วทิ้ง
2. ราคาถูก เนื่องจากส่วนประกอบที่ใช้ทำขั้ว มีราคาไม่แพงมาก เช่น แผ่นพีวีซี และหมึกที่ใช้สกรีนขั้ว ก็ใช้ในปริมาณที่น้อยด้วย
3. ใช้งานง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว
4. มีการทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากขั้วไฟฟ้าจะทำงานโดยสัมผัสกับสารโดยตรง ซึ่งไม่มีฉนวนมาบัง

จากการที่ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามารถปรับปรุงได้หลากหลายเช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไปและรวมกับข้อดีของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนดังกล่าวมาแล้ว การนำขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนไปประยุกต์แล้วเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานแล้วนั้น สามารถทำได้ตรวจวัดได้หลากหลายด้าน เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการแพทย์และด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ทำให้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.4 ลักษณะโดยทั่วไปของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ชั้นไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine - doped tin oxide electrode) [29]

สมบัติทั่วไปของฟลูออรีนทินออกไซด์

ฟลูออรีนทินออกไซด์ เกิดจากการเจือทินออกไซด์ด้วยฟลูออรีน โดยฟลูออรีนจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของออกซิเจน (oxygen site) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เรียกสารประกอบออกไซด์ที่นำไฟฟ้านี้ว่า “n-type transparent conducting oxide” ซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญดังนี้

1. สามารถยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นในช่วงความยาวคลื่น 380-700 นาโนเมตร ผ่านได้สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์
2. มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดประมาณ 5×10^{-3} โอห์ม
3. มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล มีระนาบการจัดเรียงตัว (2 1 1)
4. สามารถใส่ปริมาณฟลูออรีนต่อคิวบิกมากที่สุด ได้ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ต่อโมล

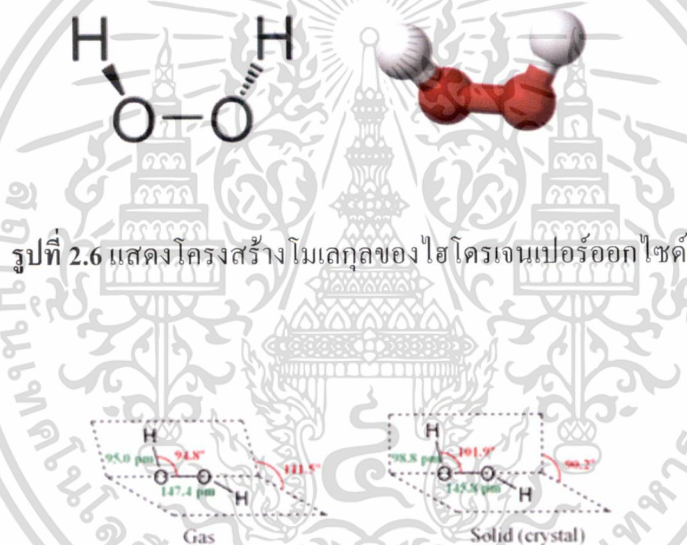


รูปที่ 2.5 ลักษณะ โดยทั่วไปของฟลูออรีนทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) [28]

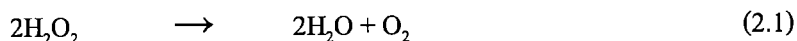
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มีชื่อตามระบบไอยูแพคว่า “ไดไฮโดรเจนไดออกไซด์” (dihydrogen dioxide) โดยมีลักษณะเป็นของเหลวสีฟ้าจาง มีความหนืดมากกว่าน้ำเพียงเล็กน้อยเมื่อเจือจางจะมีลักษณะใสไม่มีสี มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงและมีประสิทธิภาพในการฟอกสีเป็นอย่างมาก ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรคและใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ขับเคลื่อนในจรวด โดยในธรรมชาติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้เองในร่างกาย ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด (โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตที่มีกระบวนการหายใจแบบแอโรบิก) กระบวนการที่เกิดจากเอนไซม์จำพวกเปอร์ออกซิเดส (peroxidases) ซึ่งมีความปลอดภัยไม่เป็นอันตรายและสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีความเข้มข้นต่ำๆ



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีโครงสร้างทั่วไปอยู่สองรูปแบบดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะหาซื้อได้ในรูปของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามร้านขายยา ซึ่งใช้เป็นยาสำหรับล้างแผลและหน่วยของความเข้มข้นที่นิยมใช้ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ หน่วยปริมาตร (Volume) ซึ่งหมายถึงปริมาณของแก๊สออกซิเจน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวได้เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน ดังสมการ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การสลายตัวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย เช่น ไอร์ออน (III) (Fe^{3+}) หรือไทเทเนียม (III) (Ti^{3+}) ซึ่งกลไกการสลายตัวจะแตกต่างกันออกไป โดยเกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl: HO) และ (Hydro proxy free radical HOO) ร่วมด้วย ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอร์ออน (III) จะเรียกว่า “Fenton’s reagent”

โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์จะมีความเข้มข้น 20 ปริมาตร หมายความว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ปริมาตร จะให้ออกซิเจน 20 ปริมาตรดังนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 20 ปริมาตร จะเท่ากับ 1.667 โมลาร์

การใช้งานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1. ทางด้านอุตสาหกรรม

- ใช้ในงานฟอกขาวกระดาษหรือฟอกผ้า
- ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีน ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าคลอรีน
- ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

2. การใช้งานทั่วไป

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นระหว่าง 3 เปอร์เซ็นต์ ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ สามารถใช้ร่วมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้ ในการฟอกสีผม
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ใช้สำหรับล้างแผลและทำงานความสะอาดล้างเนื้อเยื่อที่ตายแล้ว

อย่างไรก็ตามการศึกษาล่าสุดชี้ให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำลายเซลล์ผิวหนังที่ใหม่ ซึ่งจะถูกลดซึมโดยผิวหนังและทำให้เกิดสถานะเส้นเลือดฝอยอุดตัน จะปรากฏเป็นสีขาวชั่วคราวที่ผิวหนังเมื่อสัมผัสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่ำๆ ใช้สำหรับทำให้สุนัขอาเจียน

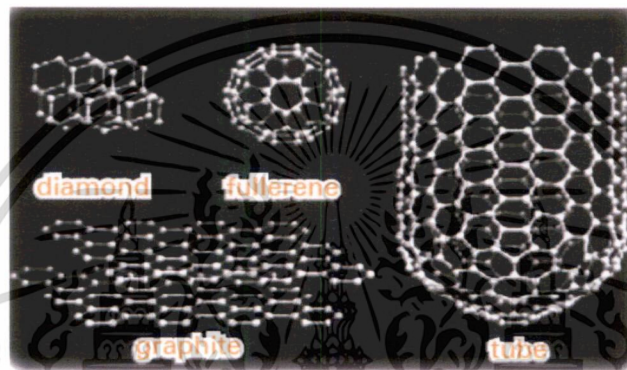
2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbonnanotubes; CNTs) [30-31]

2.6.1 ประวัติคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube)

เป็นที่ทราบกันดีว่าอะตอมของคาร์บอนสามารถเรียงร้อยต่อกันได้หลายรูปแบบ ซึ่งการร้อยต่อกันในแต่ละรูปแบบจะส่งผลทำให้เกิดวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น หากอะตอมของคาร์บอนมาร้อยต่อกันเป็นตาข่าย 3 มิติ แบบทรงแหะฮีดรัล (tetrahedral) ก็จะทำให้ได้วัสดุที่มีคุณค่าและความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งสูงที่เรารู้จักกันดีก็คือ “เพชร” (diamond) แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันในแนวระนาบเป็นรูปวงแหวน 6 เหลี่ยม (hexagonal) โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอนจะยึดเกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนอื่นอีก 3 อะตอม เราจะเรียกระนาบนี้ว่า “แกรไฟน์” (graphene) ซึ่งระนาบของคาร์บอนหรือแกรไฟน์นี้จะไม่อยู่เดี่ยวๆ ถ้าหากแกรไฟน์มาอยู่รวมกันเป็นชั้นๆ เราก็จะได้วัสดุที่เรียกว่า “แกรไฟต์” (graphite) นอกจากเพชรและแกรไฟต์แล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถมาอยู่รวมกันได้อย่างไม่เป็นระเบียบหรือไม่มีผลึกใน โครงสร้างเกิดเป็นวัสดุที่เรียกว่า “ถ่าน” (charcoal) แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาร้อยต่อกันเป็นรูปทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล เราจะเรียกโครงสร้างนี้ว่า “ฟูลเลอร์ีน” (fullerene)



รูปที่ 2.8 รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ

นอกจากวัสดุต่างๆ ข้างต้นแล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เรียกว่าวัสดุชนิดใหม่นี้ว่า “คาร์บอนนาโนทิวบ์” (carbon nanotube; CNT)

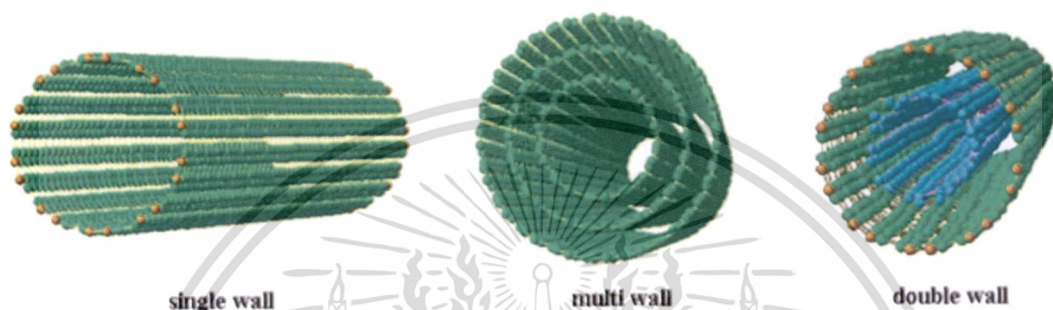
คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นรูปท่อทรงกระบอกปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของท่ออาจสูงถึงในระดับไมโครเมตรหรือมากกว่านั้น ด้วยเหตุนี้วัสดุชนิดนี้จึงมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ที่สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ค่อนข้างมาก

2.6.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Dr.Sumio Iijima ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ค้นพบในช่วงแรกนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อหลายชั้นวางซ้อนกัน (มีท่อเล็กวางอยู่ภายในช่องว่างของท่อใหญ่) เรียกคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดนี้ว่า “คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น” (multi-walled carbon nanotube; MWNT) อีก 2 ปีต่อมาก็ได้มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotube; SWNT) ขึ้น แม้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังหลายชั้นจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้นักวิทยาศาสตร์ยังคงมีความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุชนิดนี้น้อยมาก แต่เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นนี้สามารถผลิตได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นจึงมีความสำคัญในเชิงการค้าสูงกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ปัจจุบันคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นที่ผลิตจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่มีจำนวนผนัง 2 ชั้น เรียกว่า “คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนัง 2 ชั้น” (double-walled carbon nanotube; DWNT)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่างๆ

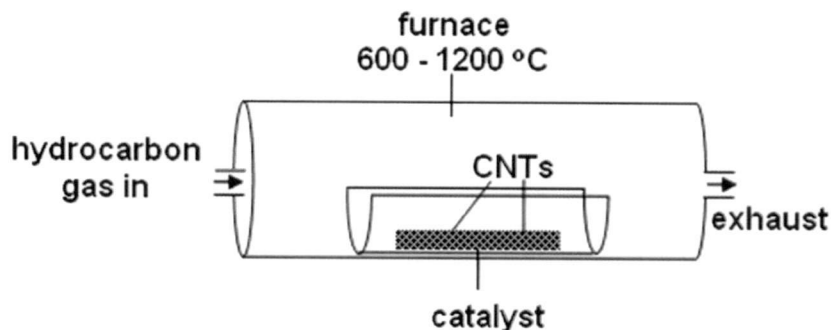
2.6.3 วิธีสังเคราะห์

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไปในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.6.3.1 การเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD)

โดยการผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ $600\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์อยู่บริเวณนั้นด้วย ทำให้โมเลกุลของแก๊สแตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบ การคุมขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์ และระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกของท่อคาร์บอนได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณข้อบกพร่องหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ

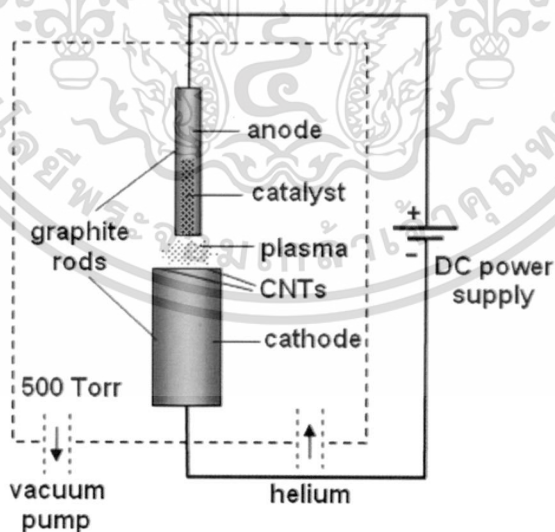
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กระบวนการตกตะกอนไอเคมีเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

2.6.3.2 อาร์คดิซชาร์จ (Arc-discharge)

ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 100-500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหิดกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะคะตะลิสต์ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)

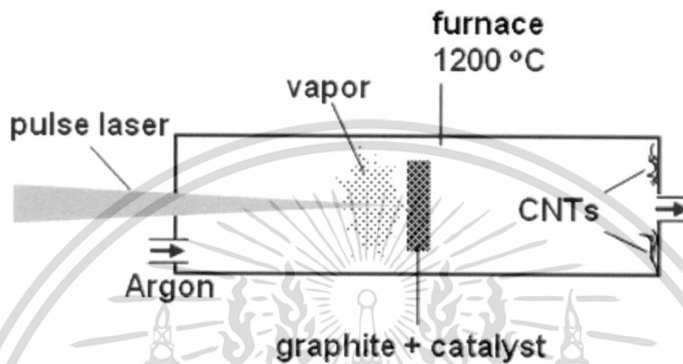


รูปที่ 2.11 กระบวนการอาร์คดิซชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.3 ระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็น แกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ที่ความดันต่ำประมาณ 500 Torr และอุณหภูมิ 1200 °C เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ ซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก



รูปที่ 2.12 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์

2.6.4 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) มีคุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เบา และมีความยืดหยุ่นที่ดี ตามปกติแล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเสถียรภาพที่ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการสังเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs และ MWCNTs) เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวบ์ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้งาน

แหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวที่น้อยมากๆ อีกทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และมีความเสถียรภาพที่ดี มีความสามารถในการจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้น จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ได้และนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีโครงสร้างเทียบเท่ากับ 1 มิติ จึงทำให้การนำไฟฟ้าในคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นแบบ ballistic กล่าวคือ ไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรานาโนอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์อีกด้วย

นาโนโพรบและเซนเซอร์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถทำเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้อีกด้วย

การกักเก็บพลังงาน : เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กระดับนาโนเมตร และมีพื้นผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 เพื่อใช้เป็นพลังงาน

เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ : คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ ได้ เนื่องจากมีค่า Young's modulus สูงถึง 1 TPa และยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์ และทางเคมีที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 – 2 nm
พื้นที่ผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.3 -1.4 g/cm ³
Tensile Strength	>60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรงๆ แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	เมื่อถูกงอก็สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ ~2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWCNTs : > 3,000 W/m.K SWCNTs : คาดประมาณ 6,000 W/m.K (มากกว่าเพชรและกราไฟต์ 2,000 W/m.K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10 ⁹ G A/cm ² (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1-3 V/μm
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ มีเสถียรภาพที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์อีกด้วย

นาโนโพรบและเซนเซอร์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถทำเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้อีกด้วย

การกักเก็บพลังงาน : เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 เพื่อใช้เป็นพลังงาน

เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ : คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ ได้ เนื่องจากมีค่า Young's modules สูงถึง 1 TPa และยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์ และทางเคมีที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 – 2 nm
พื้นที่ผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.3 -1.4 g/cm ³
Tensile Strength	>60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรง แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	เมื่อถูกงอก็สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ ~2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWCNTs : > 3,000 W/m.K SWCNTs : คาดประมาณ 6,000 W/m.K (มากกว่าเพชรและกราไฟต์ 2,000 W/m.K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10 ⁹ G A/cm ² (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1-3 V/μm
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ มีเสถียรภาพที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์

สาขาที่ประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ที่สำคัญ
วัสดุศาสตร์	เป็นส่วนผสมของวัสดุอื่นๆ เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ, เซรามิกส์, เป็นตัวนำไฟฟ้าให้กับวัสดุผสม
อิเล็กทรอนิกส์	ทรานซิสเตอร์ไดโอด, ตัวนำไฟฟ้าในนาโนอิเล็กทรอนิกส์
นาโนเทคโนโลยี	ใช้เป็น probe ใน STM, AFM, MEMS, เครื่องสร้างอุปกรณ์ MEMS
พลังงาน	กักเก็บ H ₂ , ไอออน, ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์, ขั้วในแบตเตอรี่
เคมี	ก๊าซเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง, ใช้เป็นวัสดุในสารอินทรีย์, ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี, ใช้เป็นตัวกรองทางด้านสิ่งแวดล้อม
การแพทย์	ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเวชภัณฑ์, เครื่องมือแพทย์
เป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอน	เครื่องจ่ายอิเล็กตรอนขนาดเล็ก, display (FED), หลอดไฟ

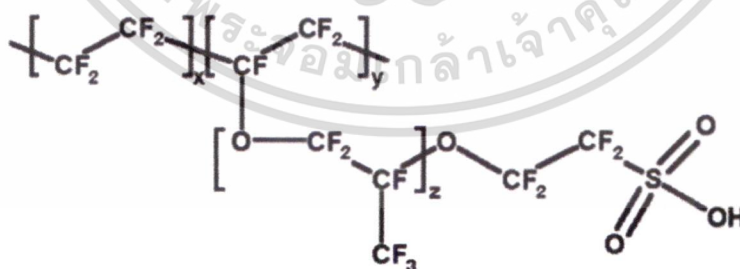
2.7 สารละลายแนฟฟิออน (Nafion solution) [32]

แนฟฟิออนเป็นสารโคโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่นิยมนำมาใช้ตรงวัสดุต่างๆ เนื่องจากมีความคงทนและค่าการนำไฟฟ้าที่สูงจึงนำมาใช้ในทางไฟฟ้าเคมี

สมบัติทางเคมีของสารละลายแนฟฟิออน

สูตรทางเคมี $C_7H_{13}O_5S_2F_4$

สูตรโครงสร้าง



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแนฟฟิออน

ชื่อสามัญ

Nafion

ชื่อ IUPAC

Sulfonate tetrafluoroethylene copolymer

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารละลายแอฟฟิออน

ทางกายภาพและทางเคมี	คุณสมบัติ
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส
กลิ่น	มีกลิ่น
ค่ากรด-เบส	เป็นกรดสูง (pKa ~ -6)
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี
การทนความร้อน	190 °C

2.8 หลักการทางเคมีไฟฟ้าทั่วไป (Principles of electrochemistry) [28]

เคมีไฟฟ้า (electrochemistry) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า หรือศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่เกิดขึ้น บริเวณขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไป จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2-3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) และขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode or auxiliary electrode)

โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าทางเคมี เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยอาศัยคุณสมบัติการเกิดปฏิกิริยาของสารดังต่อไปนี้

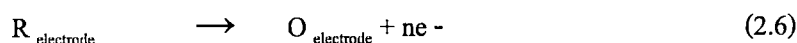
1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของสาร โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสามารถแยกออกเป็นปฏิกิริยาย่อยได้ 2 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาย่อย เรียกว่า “ครึ่งปฏิกิริยา” โดยครึ่งปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนเรียกว่า “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” (oxidation) และครึ่งปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนเรียกว่า “ปฏิกิริยารีดักชัน” (reduction) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองต้องเกิดขึ้นพร้อมกันได้จึงเรียกปฏิกิริยารวมว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์และสารละลายในปฏิกิริยานี้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการต่อไปนี้



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์ และ R เป็นสารรีดิวซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ปฏิกิริยาวិวิหพันธ์ (heterogenous reaction) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารที่ละลายในตัวทำละลายด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล (mass transfer) และอิเล็กตรอน ดังสมการต่อไปนี้



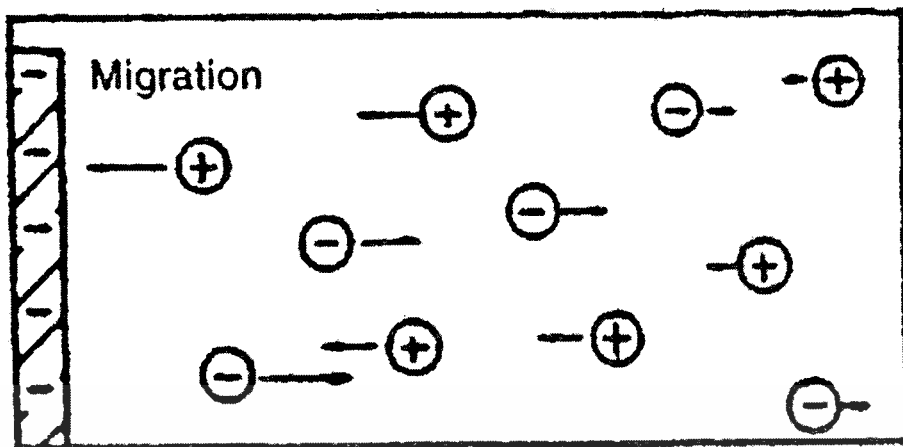
ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลของสาร ซึ่งประกอบด้วย 3 ลักษณะคือ ไมเกรชัน (migration) การแพร่ (diffusion) และการพา (convection)

2.8.1. การถ่ายเทมวลในสารละลาย (Mass transfer)

การถ่ายเทมวลในสารละลายเป็นการถ่ายเทไอออนหรือโมเลกุลไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าด้วย 3 กลไกดังที่กล่าวข้างต้นที่เกิดขึ้นกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

2.8.1.1 ไมเกรชัน (Migration)

ไมเกรชันคือ การเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง โดยแรงดึงดูดหรือแรงผลักรายได้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลาย แรงจากสนามไฟฟ้าของขั้วสามารถส่งแรงดึงดูดให้ไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้าลบและไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก (ดังรูปที่ 2.14) และความเร็วของการเคลื่อนที่เข้าหาหรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกันกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วยกันจะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการลดลงไปด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน

2.8.1.2 การแพร่ (Diffusion)

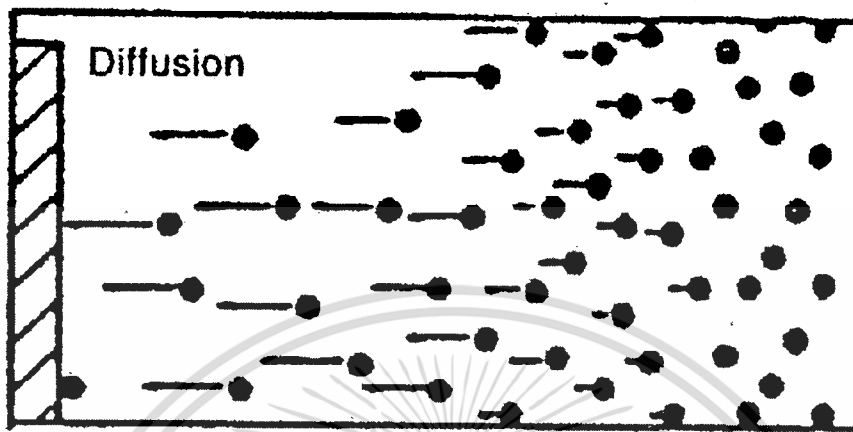
การแพร่คือ การเคลื่อนที่ของ โมเลกุลหรือ ไอออน ซึ่งจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นของ โมเลกุลที่มากกว่าไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นของ โมเลกุลที่น้อยกว่า จนกระทั่งความหนาแน่นของ โมเลกุลของสารเกิดความสมดุลคือ ความหนาแน่นของ โมเลกุลเท่ากันจึงหยุดแพร่ ซึ่งสารที่จะแพร่ได้ต้องอยู่ในสถานะ โมเลกุลหรือ ไอออนที่เคลื่อนที่ได้ เช่น สถานะก๊าซหรือของเหลวหรืออนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในตัวกลางที่เป็นของเหลวและต้องอาศัยพลังงานจลน์ที่อยู่ใน โมเลกุลหรือ ไอออนในการแพร่ โดยการแพร่ของอนุภาคของแข็งในตัวกลางที่เป็นของเหลวจะอาศัยพลังงานจลน์ของของเหลวที่กระทบ โมเลกุลของของแข็งตลอดเวลา ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมี โมเลกุลหรือ ไอออนของสารในที่ 2 แห่งหนาแน่นไม่เท่ากัน ซึ่งจะเกิดการแพร่จากบริเวณที่หนาแน่นมากไปยังบริเวณที่หนาแน่นน้อยกว่า โดย โมเลกุลของสารที่อยู่กันอย่างหนาแน่น จะชนกันเองและกระทบให้ โมเลกุลรอบนอกเคลื่อนที่ออกไปจากบริเวณที่หนาแน่นมากและจะกระจายออกไปเรื่อยๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสาร – สารที่เข้มข้นจะแพร่ได้มาก
2. อุณหภูมิ – การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การแพร่เป็นไปได้เร็วขึ้น
3. ความดัน – การเพิ่มความดันช่วยให้ โมเลกุลหรือ ไอออนของสารเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
4. สิ่งเจือปนอื่นๆ – ที่ปนอยู่ในสารจะเป็นอุปสรรคขัดขวางทำให้การแพร่เกิดได้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

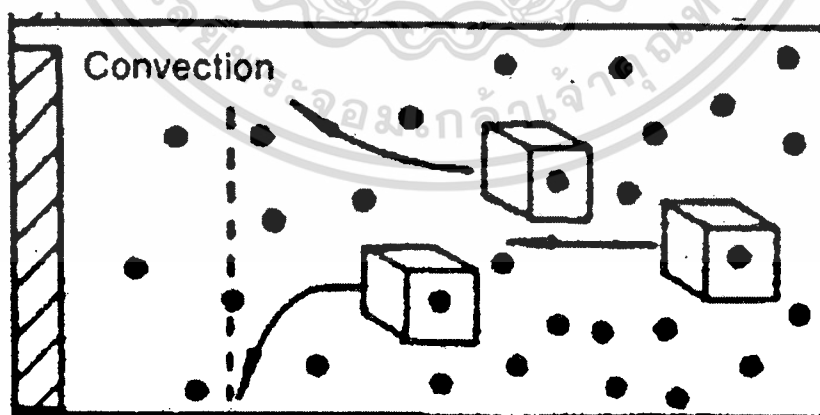
5. การดูดติดของสารอื่น – ถ้าโมเลกุลหรือไอออนของสารที่แพร่ถูกดูดติดด้วยองค์ประกอบของสารต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการแพร่ลดลง



รูปที่ 2.15 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่

2.8.1.3 การพา (Convection)

การพา คือ การที่ไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่น (มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น โดยการคนหรือการกวนสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนหรือโมเลกุลภายในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.16



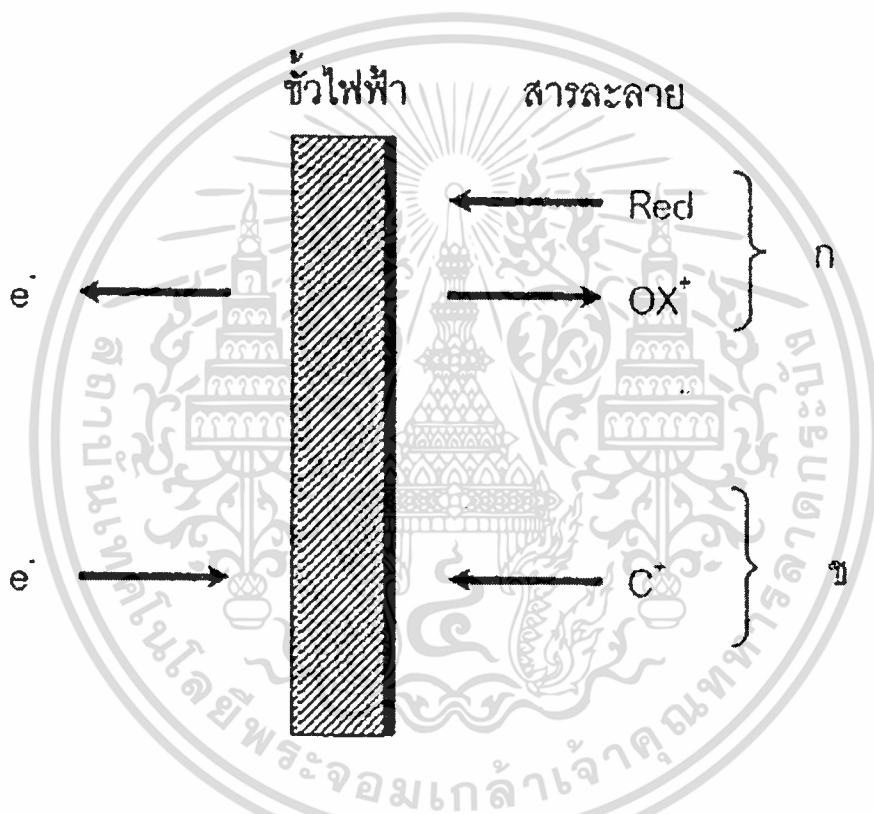
รูปที่ 2.16 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการพาไอออนจากสารละลายเข้าหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสามแบบ สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ซึ่งขึ้นกับเทคนิคการวิเคราะห์นั้นๆ

2.8.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

เมื่อไอออนของสารในอิเล็กโทรไลต์ถูกนำพาจากสารละลายมายังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะด้วยกลไกใดก็ตาม กระบวนการที่เกิดขึ้นตรงผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นไปได้โดยดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.17 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ก. กระบวนการฟาราเดอิก $\text{Red} \rightleftharpoons \text{OX}^+ + e^-$

ข. กระบวนการอัดประจุ (นอนฟาราเดอิก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นและมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นว่า “กระบวนการฟาราเดอิก” (faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการฟาราเดย์ที่อิเล็กโทรดจะทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้ เรียกว่า “กระแสฟาราเดอิก” (Faradaic current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้จะมีการจัดเรียงตัวตรงบริเวณรอยต่อนั้น ซึ่งในระหว่างการเกิดการการจัดเรียงตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่ก็ยังเป็นเพียงชั่วขณะที่มีการจัดเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (nonfaradaic process) ซึ่งกระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนั้น จะเรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (nonfaradaic current)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้าแต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ว่ามีเทอร์โมไดนามิกส์หรือจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด

2.9 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Analysis of electrochemistry) [33-34]

2.9.1 อุปกรณ์และเครื่องมือการทำโวลแทมเมตรี

เครื่องมือโวลแทมเมตรีจะประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังนี้

- เซลล์โวลแทมเมตรี
- ขั้วไฟฟ้า
- อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า

2.9.1.1 เซลล์โวลแทมเมตรี

เซลล์โวลแทมเมตรีมักใช้เรียกเซลล์เคมีไฟฟ้าในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างไปจากการทำโพเทนชิอเมตรี ตรงที่ว่า ขั้วไฟฟ้าในการทำโวลแทมเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วยหรือขั้วไฟฟ้าร่วมที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์และสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมักเรียกว่าเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ช่วยหรือเกลือหนุน (supporting electrolyte) โดยสารอิเล็กโทรไลต์ช่วยมักใช้ในปริมาณที่มากเกินไป นอกจากนี้ยังมีระบบกำจัดแก๊สออกซิเจน

1. สารอิเล็กโทรไลต์ช่วย หรือเกลือหนุน (Supporting electrolyte)

สารละลายในเซลล์โวลแทมเมตรี นอกจากจะมีสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว ยังต้องมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย โดยใช้ปริมาณมากกว่าสารละลายตัวอย่าง 50-100 เท่า เพื่อที่จะให้เกิดกระบวนการแพร่ของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามากที่สุดและให้เกิดกระบวนการไมเกรชันของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุดหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย นั่นคือ อัตราส่วนของกระแสไมเกรชัน (I_m) ต่อกระแสของการแพร่ (I_d) มีค่าน้อยมากๆ สารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรไลต์ช่วยควรเตรียมจากสารที่มีความบริสุทธิ์สูงและไม่ถูกออกซิไดส์หรือถูกรีดิวซ์ได้ง่าย ความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในช่วง 0.1-1.0 โมลาร์

หน้าที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย มีดังนี้

- ช่วยลดความต้านทานของสารละลาย
- ช่วยนำไฟฟ้าในกรณีสารตัวอย่างนำไฟฟ้าได้น้อย
- ช่วยขจัดโลหะไอออนแทรกซ้อนที่ปนมาในสารตัวอย่าง
- ช่วยป้องกันการเกิดไมเกรชัน
- ช่วยทำหน้าที่เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ (ช่วยปรับหรือรักษาพีเอช (pH) ของสารละลายให้คงที่)

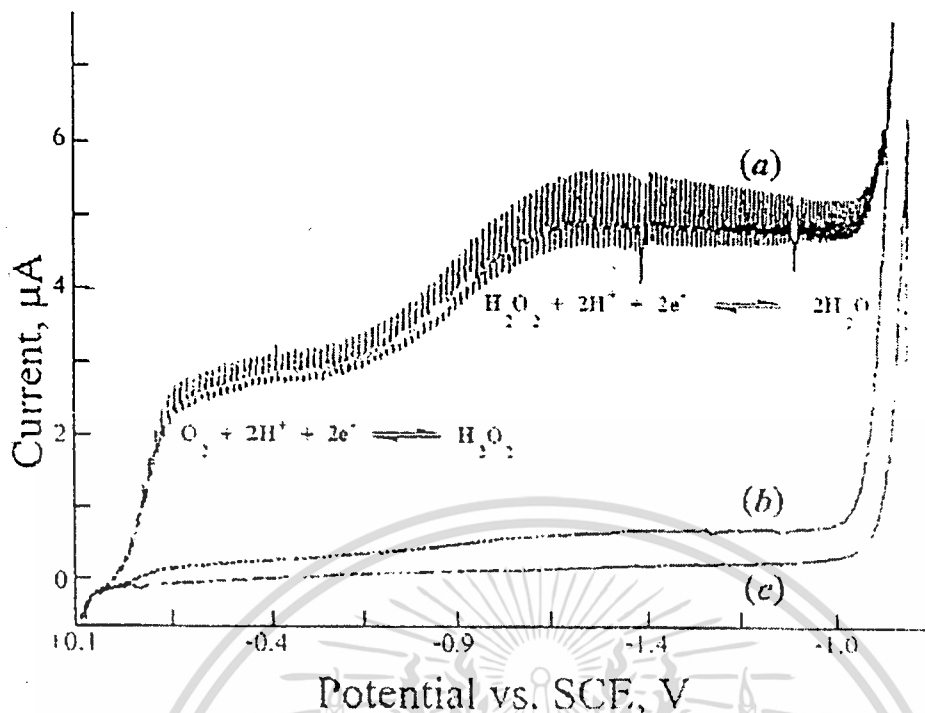
2. การกำจัดออกซิเจน

โดยปกติแล้วออกซิเจนมีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศในรูปแก๊สและละลายอยู่ในสารละลาย สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ออกซิเจนจะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิด เช่น น้ำ ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำได้ดี (ประมาณ 10^{-3} โมลาร์) ซึ่งออกซิเจนที่อยู่ในสารละลายจะเป็นสารที่รบกวนต่อการวิเคราะห์ เพราะจะเกิดกระแสเนื่องจากการแพร่อยู่สองส่วน ส่วนแรกออกซิเจนในสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันในโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีศักย์ไฟฟ้าครึ่งคลื่นเท่ากับ -0.14 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง SCE) และส่วนที่สอง ซึ่งเป็นส่วนที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ได้น้ำ โดยจะเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.9 โวลต์



ผลจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนทั้งสองปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง -1 โวลต์ โดยเฉพาะที่ศักย์ไฟฟ้า -0.14 โวลต์นั้นถือว่าต่ำมาก ซึ่งทำให้เกิดกระแสแคโทดิกได้ไม่น้อยกว่า 5 ไมโครแอมแปร์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นยังสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ในสารตัวอย่างได้ด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลายที่จะทำการตรวจวัดก่อน โดยการผ่านแก๊สเฉื่อยที่บริสุทธิ์ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอาร์กอนลงไปในสารละลายที่จะทำการวัดประมาณ 10-15 นาที ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์และผ่านแก๊สปกคลุมบรรยากาศบริเวณเหนือสารตัวอย่างตลอดการวิเคราะห์ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการละลายของออกซิเจนลงไป ในสารละลายตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 2.18 โวลแทมโมแกรมของสารละลาย 0.1 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
- (a) สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวไปด้วยอากาศทำให้เห็นรูปคลื่น (Wave) ของออกซิเจน
 - (b) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายบางส่วน
 - (c) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายจนหมด

2.9.1.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ในการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้เพื่อเทียบศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากวงจรเป็นค่าของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วจึงเรียกได้ว่าเป็น “ค่าศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์” (Relative potential) การใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงต้องมีค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าคงที่ตลอดการทดลองไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าในวงจร และสามารถควบคุมค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วย แม้ขั้วไฟฟ้าคาโทดจะเคยถูกจัดเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ได้ทั่วไปแต่ด้วยเหตุผล ด้านความเป็นพิษและผลต่อมลพิษของปรอททำให้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นที่ยอมรับในการเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแทน

2. ขั้วไฟฟาร่วม หรือขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)

ขั้วไฟฟาร่วมหรือขั้วไฟฟ้าช่วยจัดเป็นขั้วไฟฟ้าที่สามของวงจรโวลแทมเมตรี ที่มีคุณลักษณะเฉพาะคือ ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ โดยขั้วไฟฟ้าร่วมนี้จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้น ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์

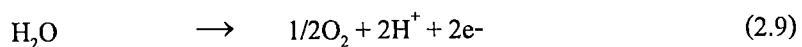
ขั้วไฟฟ้าร่วมหรือขั้วไฟฟ้าช่วยมักมีพื้นที่ผิวมากๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้าเป็นไปได้ดี ซึ่งจะลดการเกิดศักย์จากโอห์มของวงจรและควรมีความเสถียรของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ในช่วงที่กว้างขวางด้วย ซึ่งตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าร่วมหรือขั้วไฟฟ้าช่วย ได้แก่ ขดลวดแพลทินัม หรือแผ่นแพลทินัม เป็นต้น

3. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode)

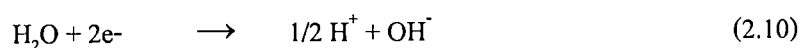
ในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรีขั้วไฟฟ้าใช้งานจะแตกต่างจากการวิเคราะห์อื่นๆ ที่ว่าขนาดของขั้วไฟฟ้าต้องเล็ก ซึ่งมักเรียกเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค ทั้งนี้เพื่อให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างมีน้อยๆ เกิดสภาวะของโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์และส่วนประกอบหลักของขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ใช้กันในทางปฏิบัติมักเป็นโลหะเนื้อเยื่อ เช่น แพลทินัม ทอง ไฟโรไลต์ กราไฟต์หรือกลาสคาร์บอนและปรอท เป็นต้น

ขั้วไฟฟ้าใช้งานในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมทรินั้น จะมีผลโดยตรงอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยส่วนใหญ่จะนิยมที่ทำมาจากแพลทินัม (Pt) คาร์บอน (C) หรือ ปรอท (Hg) เป็นต้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีควรจะให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง รวมทั้งมีการตอบสนองที่คงที่ เชื่อถือได้ตลอดอายุการใช้งานและสิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งานคือ ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์และกระแสน้ำในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งาน โดยปัจจัยย่อยอื่นๆ ที่นำมาพิจารณาด้วย เช่น ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ ค่าการนำไฟฟ้า ราคา ความยากง่ายในการหา และความเป็นพิษ เป็นต้น

โดยทั่วไปตัวทำละลายของสารตัวอย่างมักเป็นน้ำ ช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานของแต่ละขั้วไฟฟ้า หาได้จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์แก๊สอิเล็กโทรดที่มีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการศึกษาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานและมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงรวมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ศักย์ที่ให้กับวงจรจนเกิดการไหลของกระแส อันเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำและให้โมเลกุลออกซิเจนเป็นชนิดจำกัดศักย์ไฟฟ้าทางบวก

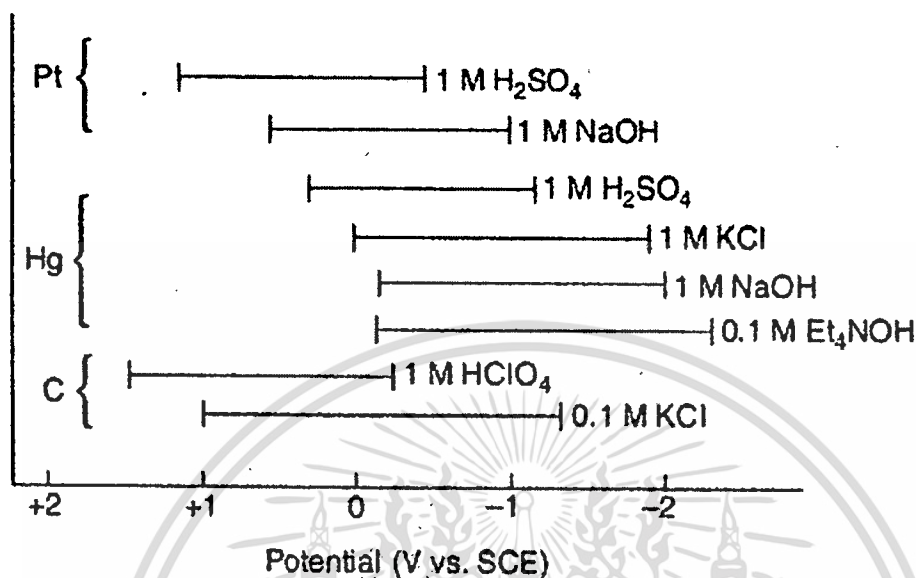


ขณะเดียวกันชนิดจำกัดศักย์ไฟฟ้าทางลบเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ และได้โมเลกุลไฮดรอกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากขีดจำกัดศักย์ทั้งบวกและลบของขั้วไฟฟ้าใช้งานจะแตกต่างกันตามชนิดของขั้วไฟฟ้าแล้วยังแตกต่างกันตามแต่ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย ซึ่งสรุปได้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าที่สามารถให้แก่ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม คาร์บอน และเมอร์คิวรี ในอิเล็กโทรไลต์เกี่ยวชนิดต่าง ๆ

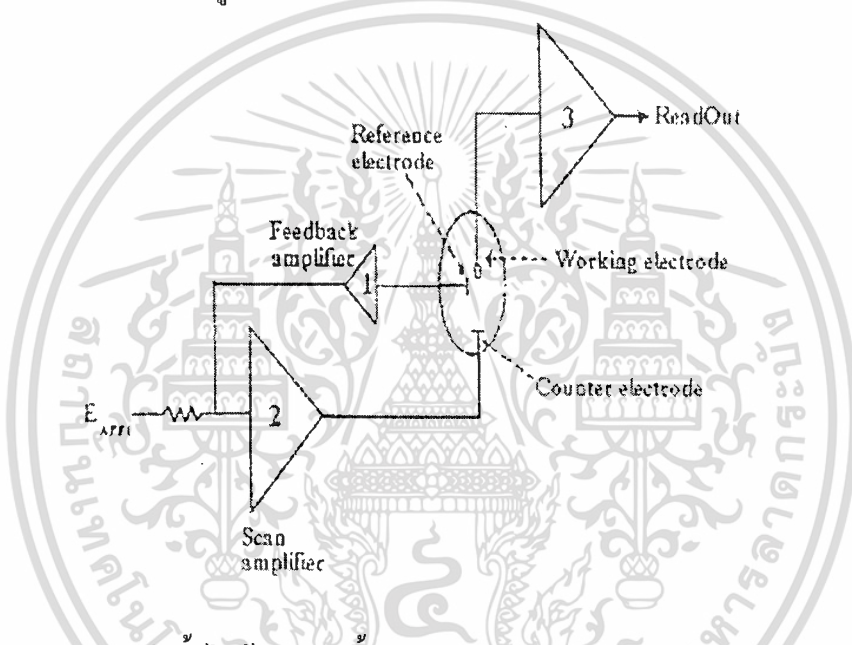
สำหรับขั้วไฟฟ้าที่เป็นแพลทินัมหรือคาร์บอน ขีดจำกัดทางบวกในการเกิดออกซิเดชันของน้ำมีค่าไม่น้อยกว่า +1.0 โวลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยที่มีความเป็นกรดสูง เช่น 1 โมลาร์ HClO₄ (C) หรือ 1 โมลาร์ H₂SO₄ (Pt) จะทำให้ขีดจำกัดศักย์ไฟฟ้าทางบวกมากขึ้น ส่วนขีดจำกัดศักย์ทางลบของทั้งแพลทินัมและคาร์บอนมีความแตกต่างกัน เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดแก๊สไฮโดรเจนของแต่ละขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขีดจำกัดศักย์ทางลบของคาร์บอนได้ -1.0 โวลต์หรือมากกว่า ซึ่งก็ขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายแต่ละชนิดด้วย ส่วนขีดจำกัดศักย์ทางลบของแพลทินัมได้เพียง -0.1 โวลต์ ส่วนขั้วไฟฟ้าปรอทมีขีดจำกัดศักย์ทางบวกและลบต่างจากแพลทินัมและคาร์บอน โดยช่วงศักย์ทางบวกไม่เกิน +0.4 โวลต์ เพราะปรอทเกิดออกซิเดชันได้แต่ขีดจำกัดศักย์ทางลบมีค่ามากกว่าการใช้แพลทินัมหรือคาร์บอน เพราะศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าปรอทมีค่าสูงมาก ทำให้ศักย์ที่ใช้งานทางลบสำหรับขั้วไฟฟ้าปรอทมากถึง -2.0 โวลต์หรือตามแต่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยที่เลือกใช้

2.9.1.3 อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า

ประกอบด้วย

- แหล่งให้ศักย์ไฟฟ้า
- เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าใช้โวลต์มิเตอร์ที่อ่านค่าได้ละเอียดในช่วง 0.01-100 ไมโครแอมแปร์ (μA)

การต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าเป็นวงจรนั้นทำได้ 2 แบบคือการต่อแบบ 2 ขั้วและการต่อแบบ 3 ขั้ว ซึ่งในหัวข้อนี้ขอกล่าวเฉพาะการต่อแบบ 3 ขั้ว ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในการต่อวงจรสำหรับทำเทคนิคโวลแทมเมตรีที่ใช้ในการวิจัยนี้การต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้วสามารถเขียนเป็นผังวงจรได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงผังการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (1, 2 และ 3 แทน Op amp (Operational amplifier))

การทำงานของผังวงจร Op amp อธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อมีการให้พลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์ไฟฟ้าแก่วงจร ศักย์จะถูกส่งไปยัง Op amp (1) ซึ่งควบคุมศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไม่ให้เกิดการไหลของกระแสผ่านส่วนนี้ ผลลัพธ์คือ Op amp (1) ถูกส่งไปยัง Op amp (2) เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า โดยที่ Op amp (2) มีกระแสไหลผ่านขั้วไฟฟ้าช่วยกับขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่ต้องการวิเคราะห์ขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ขณะเดียวกันส่วนของ Op amp (2) ก็ช่วยรักษาระดับความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าใช้งานกระแสที่เกิดขึ้นจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์ถูกส่งไปยัง Op amp (3) ซึ่งต่อกับเครื่องบันทึกผลในการบันทึกหรือสร้างกราฟของค่าศักย์ที่ให้แก่วงจรกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป

2.9.2 เทคนิคโวลแทมเมทรี

โวลแทมเมทรี (voltametry) เป็นชื่อรวมของกลุ่มวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่ข้อมูลของการวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดกระแสกับการให้พลังงานศักย์แก่วงจรภายใต้สภาวะการทดลองที่เกิดกระบวนการนอนพาราเดอิกหรือเกิดโพลาริเซชันขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวน้อย (เพียงไม่กี่ตารางเมตร) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยพลังงานศักย์จากภายนอกด้วยขนาดที่เล็กของขั้วไฟฟ้าใช้งาน จึงเรียกขั้วไฟฟ้าใช้งานในเทคนิคโวลแทมเมทรีว่า ขั้วไฟฟ้าจุลภาค (microelectrode)

โวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่เข้าไปในวงจรและวัดกระแสที่เกิดขึ้น เซลล์เคมีไฟฟ้าของเทคนิคโวลแทมเมทรีจัดเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเทคนิคนี้จะแตกต่างจากเทคนิคโพเทนชิออสแตติกคือ มีการใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode) ซึ่งส่วนมากมักเป็นขั้วไฟฟ้าช่วยแพลตินัม (platinum wire auxiliary electrode) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับเทคนิคนี้มักเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค ทั้งนี้เพื่อให้เกิดโพลาริเซชันที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและเทคนิคที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้โวลแทมเมทรีคือ

1. Chronoamperometry
2. Current-Sample Polarography
3. Pulse Voltammetry
 - Normal Pulse Voltammetry
 - Differential Pulse Voltammetry
 - Square-Wave Voltammetry
 - Staircase Voltammetry
4. AC Polarography
5. Linear Sweep Polarography
6. Cyclic Voltammetry
7. Stripping Voltammetry
 - Anodic Stripping Voltammetry
 - Cathodic Stripping Voltammetry
 - Potentiometric Stripping Analysis

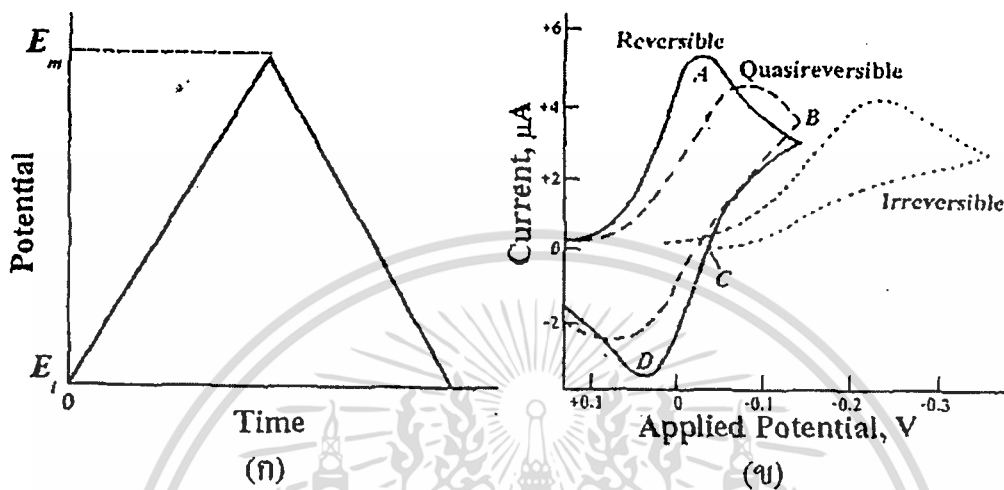
2.9.2.1. เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry)

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าและปราศจากการคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับตัวรีดอกซ์หรือตัวออกซิไดส์ในสารละลายเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรในลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.21 (ก)

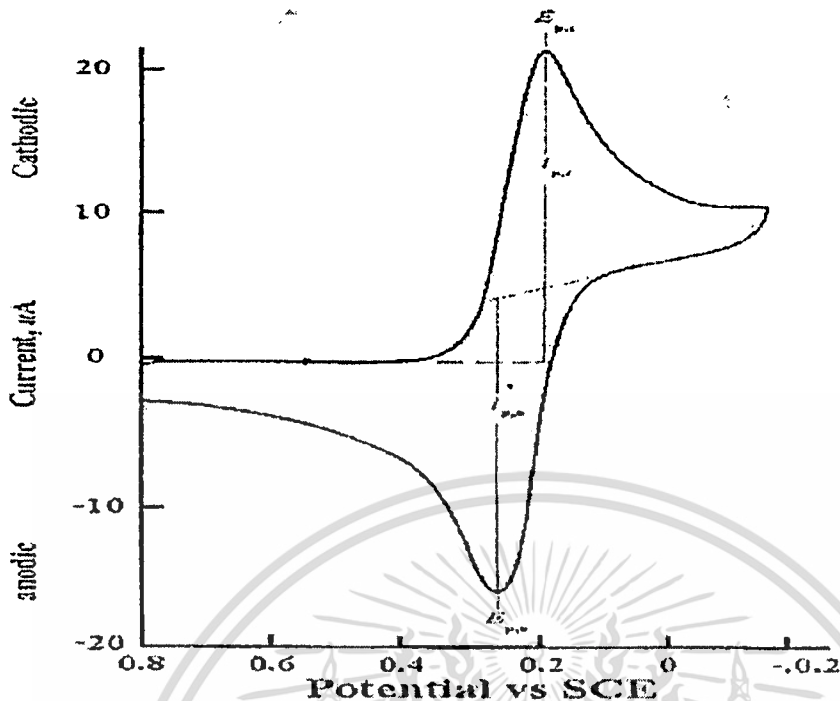


รูปที่ 2.21 (ก) โวลเทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมทรี (ข) ไซคลิกโวลแทมโมแกรม

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน ซึ่งโวลแทมโมแกรมที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.20 (ข) เมื่อเริ่มสแกนศักย์ไฟฟ้าก็จะมีกระแสเกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงจุดยอดของสามเหลี่ยมก็จะมีกระแส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นสูงสุด (กรณีที่ให้ศักย์ไฟฟ้าจากบวกไปลบ) เรียกว่า “ฟิค” และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลงด้วยอัตราเร็วเท่าเดิม กระแสก็จะค่อยๆ ลดลงจนถึงต่ำสุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงกันข้ามและลักษณะของกระแสที่ได้จะมีฟิคคล้ายกับฟิคแรก แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เฉพาะในกรณีของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible) แต่จะไม่เกิดฟิคถ้าปฏิกิริยานั้นผันกลับไม่ได้ (irreversible) ส่วนปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ (quasireversible) จะได้ฟิคที่มีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างฟิคของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้และปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้

ในการคำนวณหาค่ากระแสที่วัดได้จากโวลแทมโมแกรม ทำได้โดยการหาความสูงฟิค ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งสามารถหาความสูงได้โดยการลากเบสไลน์ (baseline) แล้ววัดส่วนสูงที่สุดมาถึงเส้นเบสไลน์ ส่วนกระแสฟิคที่วัดได้ (i_p) คำนวณได้จากสมการของ Randles-Sevcik ดังสมการ 2.12 [21, 22, 23] ซึ่งใช้กับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้

ส่วนตำแหน่งศักย์ฟิค (E_p) และความสูงของกระแสฟิค (i_p) ของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ และปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ โดยใช้สมการ 2.13 และ 2.14 [16, 24]



รูปที่ 2.22 ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แสดงวิธีการหาความสูงพีค เมื่อ i_p , E_p คือ ความสูงและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน i_{pa} , E_{pa} คือ ความสูงกระแสและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามลำดับ

$$i_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} A C D^{1/2} V^{1/2} \quad (2.12)$$

เมื่อ i_p = กระแสพีค (A)

n = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา

C = ความเข้มข้นของสารในสารละลายบัลค์ (mol/cm³)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร (cm²/s)

V = อัตราการสแกน (V/s)

A = พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (cm²)

$$E_p = E^o - \frac{RT}{\alpha n_a F} \left[0.78 - \ln \frac{k^o}{D^{1/2}} + \ln \left(\frac{\alpha n_a F v}{RT} \right)^{1/2} \right] \quad (2.13)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนประจุ

n_a = จำนวนอิเล็กตรอนในการแลกเปลี่ยนประจุ

k^o = ค่าคงที่อัตรามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } i_p = 2.99 \times 10^5 n(\alpha n_a) A C D^{1/2} V^{1/2} \quad (2.14)$$

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า $V^{1/2}$ ซึ่งถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการนี้เป็นแบบ Diffusion-control คือกระแสที่ได้จากปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระแสที่ถูกควบคุมโดยการแพร่หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เร็ว จนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species เคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์ (bulk solution) โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะแพร่ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การแพร่เข้ามาของ ไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species ดังกล่าว ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Diffusion-control

ในกรณีที่มีการเกิดสารผลิตภัณฑ์ หรือมี Electroactive species ติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสฟิคที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ 2.15 [25]

$$i_p = \frac{n^2 F^2 A \Gamma v}{4RT} \quad (2.15)$$

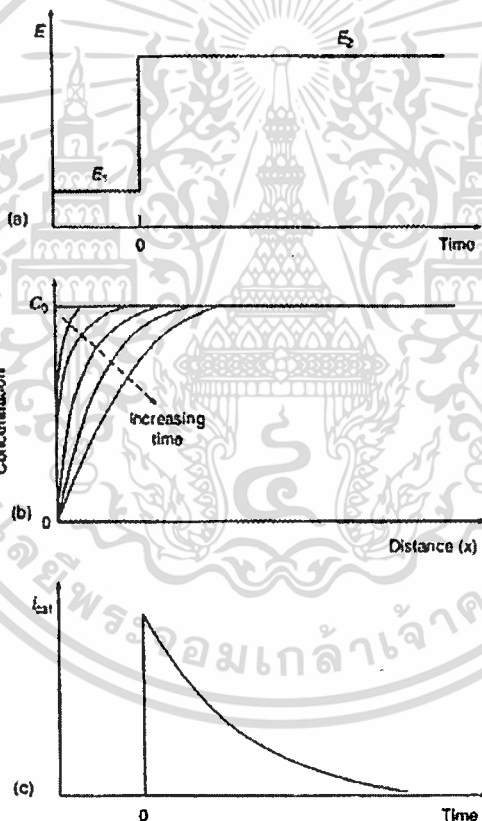
เมื่อ i_p = กระแสฟิค (A)
 Γ = ปริมาณฟิล์มเชิงเส้นพื้นที่ผิว (mol/cm^2)

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า V ถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการเป็นแบบ Surface-control หมายความว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นจนกลายเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา เพราะว่า ไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species ที่เคลื่อนที่ได้เร็วพอๆ กับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงถูกควบคุม โดยความเร็วของปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า จึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Surface-control

การแยกฟิคว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control หรือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Surface-control ทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง $\log i_p$ กับ $\log V$ ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแล้วพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 0.5 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control ส่วนถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Surface-control แล้วถ้ากราฟมีความชันเท่ากับ 1 ที่อัตราการสแกนต่ำและมีความชันเท่ากับ 0.5 ที่อัตราการสแกนสูงหมายความว่า ปฏิกิริยาเป็นแบบผสมระหว่าง Surface-control กับ Diffusion-control

2.9.2.2. เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (Chronoamperometry)

โครโนแอมเพอโรเมทรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานในลักษณะคงที่ โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แกขั้วไฟฟ้าใช้งานจากค่าตรงจุดที่เกิดปฏิกิริยาฟาราเดอิก ซึ่งเริ่มจากจุดศักย์ไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นของ Electroactive species ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีผลเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23(a) ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าอยู่กับที่และปราศจากการกวนสาร การเคลื่อนที่ของมวลภายใต้สภาวะนี้จะมีเพียงการแพร่แล้วกราฟของปริมาณกระแสที่ได้จะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องที่ละน้อยๆ ในบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าขั้วไฟฟ้ารวมถึงค่อยๆ แผ่ขยายออกชั้นการแพร่พร้อมๆ กับ Reactant ที่ลดลงทีละน้อยๆ ดังนั้นผลที่แสดงความเข้มข้นจะเห็นว่าค่อยๆ ลดลงในลักษณะลาดชันตามเวลาที่ผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.23(b) ซึ่งตามนี้แล้วกระแสไฟฟ้า (ที่ Planar electrode) ลดลงเทียบกับเวลาที่ผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.23(c)



รูปที่ 2.23 โครโนแอมเพอโร (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา
(b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับระยะทางที่เวลาต่างๆ
(c) กราฟแสดงกระแสที่อ่านได้

ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์เรียกว่า สมการ Cottrell equation

$$i(t) = \frac{nFACD^{1/2}}{\pi^{1/2}t^{1/2}} = kt^{-1/2} \quad (2.16)$$

เมื่อ i = กระแสการแพร่ (A)
 n = จำนวนของอิเล็กตรอน
 F = ค่าคงที่ Faraday (C/mol)
 A = พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (cm^2)
 C = ความเข้มข้น (mol/cm^3)
 D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)
 t = เวลา (s)

ดังนั้น $it^{1/2}$ คงที่มักอยู่ในทอม Cottrell behavior ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากพฤติกรรมที่ปรากฏที่ระยะเวลายาวนาน (มากกว่า 100 วินาที) เป็นผลจากการพาตามธรรมชาติหรือเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าจุลภาค (microelectrodes) ที่มีอัตราส่วนเส้นรอบวงต่อพื้นที่ผิวสูง ในกรณีหลังเป็นกรณีกระแส (เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น) ที่ขึ้นกับเวลา จะได้เวลามากกว่า 0.1 วินาที เนื่องจากมีรัศมีของการแพร่ที่กว้าง

ขั้วไฟฟ้าแบบ Spherical electrodes ก็ใช้หลักในการพิจารณาคล้ายๆ กัน ซึ่งค่ากระแสที่ตอบสนองจะเป็นไปตามขั้นของศักย์ไฟฟ้า โดยจะมีทั้งส่วนที่เป็น Time-dependent ดังแสดงส่วนที่เป็น Time-independent ดังสมการ

$$i(t) = nFAD_oC_o(b)/(\pi D_o t)^{1/2} + nFaD_oC_o/r \quad (2.17)$$

สำหรับค่าเวลาน้อยๆ ($t < 50 \text{ ms}$) สัญญาณของโคร โนแอมเพอ โรเมทรี จะมีสัญญาณพื้นของการอัดกระแสรวมอยู่ด้วย

$$i_c = \frac{E}{R_s} e^{-t/RCa} \quad (2.18)$$

(การอัดกระแสไฟฟ้าจะเหมือนที่เกิดขึ้นเมื่อเราจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในวงจรแบบอนุกรม (series RC circuit)) กระแสการอัดประจุนี้จะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นสัญญาณตอบสนองให้เราเห็นแม้ไม่มี Electroactive species ก็ตาม

โคร โนแอมเพอ โรเมทรี นิยมใช้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Electroactive species หรือวัดพื้นที่ผิวของหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานและใช้งานทางด้านวิเคราะห์ทดสอบสารชีวภาพ เช่น กลูโคสในเลือดหรืองานทางด้านเอนไซม์ ซึ่งโคร โนแอมเพอ โรเมทรี ยังสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้ในการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและ โคร โนแอมเพอโรเมทรียังสามารถบันทึกค่าประจุ (บันทึกประจุเทียบกับเวลา Charge-tie dependence) ซึ่งสามารถทำได้โดยรวบรวมค่ากระแสที่ได้จากศักย์ไฟฟ้าต่างๆ และทำการปรับแก้ค่าให้ถูกต้อง โดยเพิ่มค่าประจุเนื่องจาก Double-layer charging (Q_{dl}) และค่าประจุที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับ (Q_i) ตามสมการ 2.19

$$Q = \frac{2nFACD^{1/2}t^{1/2}}{\pi^{1/2}} + Q_{dl} + Q_i \quad (2.19)$$

ซึ่งเทคนิคการวัดประจุจะเรียกว่า “Chronocoulometry” ซึ่งสามารถใช้สำหรับวัดปริมาณตัวทำปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับอยู่ (เนื่องจากสามารถที่จะแยกค่าประจุที่เกิดขึ้น โดยการดูดซับและ solution species) การสร้างกราฟของประจุ (Q) เทียบกับเวลา $t^{1/2}$ จะเรียกว่า “Anson plot” ซึ่งค่าของจุดตัดแกนที่เวลาเท่ากับศูนย์ ก็คือค่าของประจรรวม (Q_{dl} และ Q_i) ที่เกิดจาก Double-layer charging และปฏิกิริยาการดูดซับ ซึ่งสามารถประมาณค่าจุดตัดแกนที่ได้นี้แล้วนำไปหักลบเพื่อปรับแก้ โดยเป็นการหักลบค่าของสารละลายแบบลงค้อออกไปได้ให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.10 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีวิเคราะห์

2.10.1 ความจำเพาะเจาะจง (Specificity/Selectivity)

การศึกษาค่าจำเพาะเจาะจงของวิธีคือ การศึกษาว่าวิธีนั้น มีการตอบสนองต่อสารที่กำลังศึกษาเพียงอย่างเดียวหรือตอบสนองต่อสารอื่นที่มีในตัวอย่าง หรือ ต่อ species อื่นๆ ของสารที่กำลังศึกษาด้วย (เช่นกรณีสารประกอบของธาตุที่มี oxidation state หลายค่า) ถ้ามีการตอบสนองต่อสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารที่ศึกษาเพียงอย่างเดียวแสดงว่าวิธีนั้น ไม่มีความจำเพาะเจาะจง และสารอื่นๆ เหล่านี้จะทำให้เกิด systematic error

การทดสอบความจำเพาะเจาะจงเชิงปริมาณเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก เพราะจะต้องมีการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารที่สนใจ และสารที่อาจรบกวนเหล่านั้นหลายระดับ ดังนั้น การทดสอบเชิงคุณภาพจึงเป็นที่ยอมรับ ซึ่งทำได้โดยการใช้สารมาตรฐาน, matrix blank, spiked matrix blank, กรณีที่ไม่สามารถหา matrix blank ได้ ก็อาจใช้ blank อื่นๆ ที่เหมาะสมได้

การทดสอบความจำเพาะเจาะจง

2.10.1.1 กรณีที่มี matrix blank

วิเคราะห์ matrix blank กับ spiked matrix blank ถ้าสัญญาณของ matrix blank น้อยมากเมื่อเทียบกับ spiked matrix blank แสดงว่า ไม่มีการรบกวนจากสารอื่นในตัวอย่าง (ยกเว้นการวิเคราะห์สารตกค้าง ซึ่งค่าของ blank มักจะใกล้เคียงกับ analyte ที่ระดับ detection limit)

ควรแสดงผลการเปรียบเทียบให้ชัดเจน เช่น โครมาโทแกรม ข้อมูลตาราง หรือ สเปกตรัม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.2 กรณีที่ไม่มี matrix blank

วิเคราะห์ตัวอย่าง โดยใช้วิธีที่กำลังศึกษาและยืนยันด้วยเทคนิคอื่น โดยเฉพาะเทคนิคที่ให้ spectral data เช่น mass spectrometry (MS), atomic emission spectrometry (AES), NMR, IR, UV, fluorescence เป็นต้น โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ทั้งนี้ต้องทำ method blank ด้วย เพื่อวิเคราะห์สารรบกวนอื่นๆ ที่นอกเหนือจาก sample matrix

2.10.1.3 กรณีที่มีวิธีมาตรฐานที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อ sample matrix นั้นๆ

วิเคราะห์ตัวอย่างที่กำลังศึกษา เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน ถ้าพบว่า มีการรบกวน ต้องหาสาเหตุและแก้ไข หากพบว่ามาจาก matrix จะต้องปรับ (optimize) หรือดัดแปลง (modify) วิธีให้ดีขึ้น

2.10.2 ช่วงของการวัดและความเป็นเส้นตรง (Working range and Linearity)

ช่วงของการใช้งานหรือช่วงของการวัดเป็นช่วงของความเข้มข้นของสารซึ่งวิธีวิเคราะห์จะใช้ได้ ส่วนความเป็นเส้นตรงเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวิธีวิเคราะห์ที่แสดงความสัมพันธ์อย่างเป็นสัดส่วน โดยตรงระหว่างสัญญาณจากเครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นของสารในช่วงของการใช้งาน ช่วงของการใช้งานจะเริ่มต้นจาก LOD (ถ้าทราบค่า LOD) หรือ LOQ ช่วงของความเป็นเส้นตรงจะเป็นส่วนหนึ่งของช่วงของการใช้งานและเริ่มต้นที่ LOQ ทั้งช่วงการใช้งานและช่วงของความเป็นเส้นตรงเป็นช่วงที่วัดได้ในสารละลายที่วัดด้วยเครื่องมือวัดไม่ใช่ในสารตั้งต้น การทดสอบความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์ ทำได้โดยการทดสอบความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน (calibration curve) และทดสอบ matrix effect โดยใช้สถิติที่เหมาะสม กราฟมาตรฐานสร้างขึ้นจากการพลอตความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากเครื่องมือวัดกับความเข้มข้นของสารมาตรฐานของสารที่กำลังศึกษา สำหรับกราฟมาตรฐานที่เป็นเส้นตรง ปริมาณสารในตัวอย่างหาโดยการคำนวณจากค่าความชันและจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ดังนั้นการสร้างกราฟมาตรฐานจะต้องให้ความคลาดเคลื่อนสุ่มน้อยที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าความชันและจุดตัดแกนซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มระดับความเข้มข้นและการทำซ้ำในแต่ละระดับ

Matrix effect หมายถึง การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสัญญาณจากเครื่องมือวัดอันเป็นผลมาจากส่วนประกอบอื่นๆ ที่มีในตัวอย่างแต่ไม่ใช่สารที่กำลังศึกษา

2.10.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

2.10.2.1.1 กำหนดช่วงของกราฟมาตรฐานให้ครอบคลุมความเข้มข้นใน final solution ของสารตัวอย่าง (เช่น ช่วง 0-150% หรือ 50-150% ของความเข้มข้นใน final solution เป็นต้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2.1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐาน ให้มีความเข้มข้นอย่างน้อย 6 ระดับ แต่ละระดับให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการทำ 3-4 ซ้ำ และควรเตรียมให้มีความห่างของแต่ละระดับเท่าๆกัน (ถ้าน้อยกว่า 6 ระดับจะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูงเกินไป ถ้าเกิน 20 ระดับ การลดลงของความคลาดเคลื่อนไม่มากนัก)

2.10.2.1.3 วัดสัญญาณจากเครื่องมือวัดจากเครื่องมือวัด โดยวัดแบบสุ่ม

2.10.2.1.4 พล็อตความเข้มข้นของสารมาตรฐานบนแกน x และสัญญาณที่อ่านได้บนแกน y (รวมทั้ง ค่า blank ด้วย)

2.10.2.2 การหาค่าคืนกลับ (%Recovery)

เรามักพบว่าวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ยังไม่ได้วัดปริมาณสารที่เราสนใจครบถ้วน 100% ทุกวิธี ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าวิธีเหล่านั้นไม่สมบูรณ์ อาจมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์ในการวัดปริมาณสารที่มีอยู่ทั้งหมด แต่เนื่องจากในความเป็นจริงเราไม่ทราบว่าสารที่เราสนใจมีอยู่เท่าไรจึงยากที่จะบอกได้ว่าวิธีวิเคราะห์ที่ใช้สามารถสกัดสารนั้นออกมาได้ดีแค่ไหน วิธีการหนึ่งคือการเติมสารที่มีความเข้มข้นต่างๆในช่วงการใช้งานลงใน matrix blank หรือ sample blank จากนั้นจึงจึงวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ระบุในวิธีวิเคราะห์และคำนวณค่า % recovery ของสารที่เติมลงไป

วิธีหาเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ

1. เตรียม matrix blank หรือ sample blank (unspiked) ให้มีปริมาณพอเพียง
2. เตรียม spiked matrix blank หรือ spiked sample โดยการเติมสารมาตรฐานให้มีความเข้มข้นระดับต่างๆ ใน working range อย่างน้อย 3 ระดับและเตรียมให้ปริมาณมากพอสำหรับการวิเคราะห์อย่างน้อยระดับละ 6 ซ้ำ ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. วิเคราะห์ matrix blank หรือ sample (unspiked) 6 ซ้ำ
4. วิเคราะห์ spiked matrix blank หรือ fortified sample blank ระดับละ 6 ซ้ำ
5. ทำการคำนวณ %Recovery

$$\%R = \frac{C_1 - C_2 \times 100}{C_3}$$

- เมื่อ
- C_1 คือ ความเข้มข้นของสารใน spiked matrix blank
 - C_2 คือ ความเข้มข้นของสารใน matrix blank
 - C_3 คือ ความเข้มข้นของสาร analyte ที่เติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติมักพบปัญหาการที่ไม่สามารถหา matrix blank หรือ sample blank ได้ จึงจำเป็นต้องใช้ matrix หรือ sample ที่มีสารที่สนใจในระดับไม่ต่ำมากมาหาค่า recovery กรณีนี้ ความเข้มข้นที่เดิมควรสูงกว่าความเข้มข้นที่มีอยู่เดิม

2.10.2.3 ความเที่ยง (Precision)

ค่าความเที่ยงเป็นคุณลักษณะเฉพาะของวิธีที่แสดงถึงความใกล้เคียงกันของผลการวิเคราะห์ซ้ำภายใต้สภาวะที่กำหนด ความเที่ยงจะบอกถึงความคลาดเคลื่อนสุ่ม (random error) ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไป การแสดงความเที่ยงของการวิเคราะห์แสดงได้หลายแบบ เช่น การทวนซ้ำได้ (repeatability) หรือ การทำซ้ำได้ (reproducibility)

การหาค่าความเที่ยง

เตรียมตัวอย่าง หรือ RM ที่จะใช้ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน working range โดยแต่ละระดับเตรียมให้มีปริมาณมากพอสำหรับการวิเคราะห์เพื่อศึกษา ความเที่ยงอย่างน้อย 10 ซ้ำ

การทวนซ้ำได้

1. วิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียมไว้ทุกระดับความเข้มข้น ระดับละ 10 ซ้ำ โดยนักวิเคราะห์คนเดียวกัน เครื่องมือชุดเดียวกัน ในเวลาเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน
2. คำนวณค่า SD ของแต่ละความเข้มข้น
3. คำนวณค่า % RSD จะได้ repeatability ที่ความเข้มข้นนั้นๆ

$$\%RSD = \frac{SD \times 10}{\bar{X}}$$

2.10.2.4 ขีดจำกัดในการตรวจพบ (Limit of detection) และขีดจำกัดของการวัด

เชิงปริมาณ (Limit of quantitation)

Limit of detection (LOD) เป็นความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่สนใจในตัวอย่างที่วิธีทดสอบสามารถตรวจวัดได้โดยความเชื่อมั่นที่ 99% โดยที่ความเข้มข้นระดับนี้ ไม่อาจบอกปริมาณที่มีความถูกต้อง และเที่ยงตรงในระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจากมีความไม่แน่นอนสูง

Limit of quantitation (LOQ) เป็นความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่สนใจในตัวอย่างที่วิเคราะห์สามารถตรวจวัดได้ ที่ความเข้มข้นระดับนี้สามารถรายงานเป็นปริมาณที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงในระดับที่ยอมรับได้ (30%)

การคำนวณ ค่า LOD จากจุดตัดของกราฟมาตรฐานที่เตรียม โดยใช้ sample blank

1. สร้างกราฟมาตรฐาน โดยใช้ spiked sample blank โดยให้ครอบคลุมความเข้มข้นของสารละลายสุดท้ายของตัวอย่างก่อนวัด และมีอย่างน้อย 6 ระดับความเข้มข้น ระดับละ 3-4 ซ้ำ มีความห่างของแต่ละระดับเท่าๆกันและระดับแรกควรเข้าใกล้ 0

2. คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน y-intercept จากสูตร

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(X_i\bar{X})}{n-1}}$$

3. นำค่า SD คูณด้วย 3 แล้วนำไปแทนค่า y ในสมการเส้นตรง เพื่อหาค่า x ซึ่งเป็นค่า LOD

4. กรณี ค่า LOQ SD คูณด้วย 10 แล้วนำไปแทนค่า y ในสมการเส้นตรง เพื่อหาค่า x ซึ่งเป็นค่า LOQ

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

Abdollah Noorabakhsh และ Abollah Salimi [35] ได้เตรียมขั้วไฟฟ้ากลาสสิกคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์ อนุภาคขนาดนาโนเมตร และสีย้อมที่ละลายน้ำได้ 2 ชนิดคือ ไรโอโนนและซีเลสทีน บลู โดยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมทั้งสองชนิด โดยการเปรียบเทียบการกระจายตัวบนผิวหน้าขั้วและค่าคงที่การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (K_s) ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่า ไรโอโนน ให้ค่าการกระจายตัวบนผิวหน้าขั้วและค่าคงที่การถ่ายโอนอิเล็กตรอน เท่ากับ 3.5×10^{-10} และ 6.12 s^{-1} ตามลำดับ การเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการเร่งปฏิกิริยาของสีย้อมทั้งสองชนิดให้ค่าคงที่อัตราการเร่งปฏิกิริยา ดังนี้ ไรโอโนนและซีเลสทีน บลู ให้ค่าอัตราการเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ $7.96 (\pm 0.2) \times 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด เท่ากับ $1.67 \mu\text{M}$ สำหรับไรโอโนน และ $5 \mu\text{M}$ สำหรับซีเลสทีน บลู ค่าสภาพไวสำหรับการตรวจวัดเท่ากับ $4.14 \text{ nA} \cdot \mu\text{M}^{-1}$ สำหรับไรโอโนน และ $1.00 \text{ nA} \cdot \mu\text{M}^{-1}$ สำหรับซีเลสทีน บลู และช่วงของความเป็นเส้นตรงเท่ากับ $5 \mu\text{M}$ ถึง 20 mM และ $1 \mu\text{M}$ ถึง 10 mM สำหรับไรโอโนน และ ซีเลสทีน บลู ตามลำดับ

Rike Yudianti และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้กรดผสมระหว่างกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ศึกษาอุณหภูมิในการรีฟลักซ์ ระหว่าง 80 ถึง $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของกรดที่เหมาะสมในการล้างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ อัตราส่วนระหว่างกรดไนตริกและกรดซัลฟูริกเป็น 3:1 และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีฟลักซ์ คือ $100 \text{ }^\circ\text{C}$

Yang Liu และคณะ [37] ได้พัฒนาขั้วไฟฟ้าคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิเกิลและนิเกิลออกไซด์ ขนาดอนุภาคนาโนสำหรับตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของกลูโคส ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM), Transmission Scanning electron microscopy (TEM), Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) และเทคนิค X-ray powder diffraction (XRD) และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิคแอมเพโรเมทรี ซึ่งจากการทดลองพบว่าให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ $1 \mu\text{M}$ และช่วงของความเป็นเส้นตรงที่ $2 \mu\text{M}$ ถึง 2.5 mM ซึ่งถือว่าให้สภาพไวในการตรวจวิเคราะห์ที่ดีและช่วงของความเป็นเส้นตรงที่กว้าง

N. Dharmaraj และคณะ [38] ได้หาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์นิเกิลออกไซด์โดยใช้นิเกิลอะซิเตตและโพลีไวนิลอะซิเตต เป็นสารตั้งต้น ซึ่งลักษณะผลึกของนิเกิลออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 40-50 นาโนเมตร ซึ่งการเตรียมโดยผสมนิเกิลอะซิเตตและโพลีไวนิลอะซิเตตเป็นสารตั้งต้นแล้วให้ความร้อน $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำการศึกษาคุณลักษณะของนิเกิลออกไซด์โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM), Transmission Scanning electron microscopy (TEM), Raman spectrum, UV-visible absorption spectrum, FT-IR และเทคนิค X-ray powder diffraction (XRD)

Vijaykumar Ijeri และคณะ [39] ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเมมเบรนที่ใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และแนฟฟิออนสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กโทรด ซึ่งการเตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/แนฟฟิออนจะใช้สารละลายเมทานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งเมมเบรนที่เตรียมได้เมื่อนำมาทดสอบทางกายภาพจาก Scanning electron microscopy (SEM), และวัดค่าการนำไฟฟ้า ใน SEM พบว่ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีการกระจายตัวที่ดีและให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเหมาะที่จะใช้ในการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

Mojtaba Shamipur และคณะ [40] ได้ทำการปรับแต่งหน้าขั้วกลาสคาร์บอนด้วยนิเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณกลูโคส ซึ่งการเตรียมขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/นิเกิลออกไซด์ เตรียมโดยการนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เคลือบบนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนแล้วนำไปหยดนิเกิลไนเตรตจากนั้นนำไปพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการนำขั้วไฟฟ้างัดกล่าวไปใช้วัดหาปริมาณกลูโคสพบว่าให้ช่วงของการวัดระหว่าง $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ถึง $1.2 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดคือ $1.6 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

V.Mucka และคณะ [41] ได้ทำการศึกษา โลหะออกไซด์ผสมระหว่างนิกเกิลออกไซด์และทอเรียมออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าออกไซด์ของโลหะผสมดังกล่าวให้ค่าการเร่งปฏิกิริยาที่กว้างอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 wt.% ในขั้นตอนแรกหลังจากการฉายรังสีแกมมา 1 MGy หรือ 1 และ 3 MGy ในอากาศและในน้ำ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวทดสอบปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเฉพาะนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าของออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของออกไซด์ที่ดีมาก การเปลี่ยนแปลงแอกติวิตีของการเร่งปฏิกิริยาของ NiO ศึกษาได้จากการลดปริมาณของไฮโดรเจนในตัวอย่าง

Ji Yeong Lee และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาใช้นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นตัวเก็บประจุทางเคมีไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่านิกเกิลออกไซด์จะเกาะอยู่บนมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ทำให้เพิ่มบริเวณผิวหน้าของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำให้ค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น 34% ดังนั้นจะพบว่าผงของสารผสมระหว่างนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นำมาปรับปรุงตัวเก็บประจุให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

PengWang และคณะ [43] ได้ใช้ไบโอเซนเซอร์ทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งใช้การเชื่อมโยงระหว่างฮอสมเรดิสเปอร์ออกซิเดส (horseradish peroxidase: HRP) กับพอลิอะนิลีน (polyaniline: PANI) โดยมีกลูตาโรลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เป็นตัวเชื่อมโยงเคลือบบนขั้วฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide: FTO) แล้วสารพอลิอะนิลีนสามารถสังเคราะห์จากสารละลาย 1-เอทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียม โซเลียมเอทิลซัลเฟต (1-ethyl-3-methylimidazolium ethyl sulfate: EMIBS) ซึ่งจะให้สัญญาณการตอบสนองเพิ่มขึ้น (เป็นเส้นตรง) ซึ่งจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นถึง 20 มิลลิโมลาร์ แล้วให้สัญญาณตอบสนองสูงสุด (I_{max}) ที่ 1.189 ไมโครแอมแปร์ และค่าที่ของมิเคลิส-เมนเทน (Michaelis-Menten constant) เท่ากับ 27.11 มิลลิโมลาร์ การตอบสนองของสัญญาณต่อไบโอเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 40 องศาเซลเซียส โดยพลังงานกระตุ้นของตัวเร่งฮอสมเรดิสเปอร์ออกซิเดสในสารละลายบีพีเฟออร์บี-อาร์อยู่ที่ 39.1 กิโลจูลต่อโมล (มีค่าที่สูงและมีเสถียรภาพที่ดี) ซึ่งสามารถดูได้จากสเปกตราวูวี-วิสิเบิลที่แสดงตำแหน่งที่รวมกันระหว่างฮอสมเรดิสเปอร์ออกซิเดสกับพอลิอะนิลีน ที่ตำแหน่งไนโตรเจนของควินนอยด์และในโครงสร้างของพอลิอะนิลีนจะศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry: CV)

Wei Zhao, Huicai Wang และคณะ [44] ได้ศึกษาวิธีการสร้างตัวเซ็นเซอร์ในตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยอาศัยพัฒนาจากหลักการของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์/ซิลเวอร์นาโนพาร์ทิเคิลนาโนไฮบริด (Multi-wall carbon nanotube/silver nanoparticle nanohybrids:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MWCNT/Ag nanohybrids) ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทอง ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิล นาโนไฮบริด จะมาจากแนวความคิดที่มีประสิทธิภาพในการประพติตัวของกลุ่มคาร์บอนซิลที่เกี่ยวเนื่องกับการทำงานมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Multi-wall carbon nanotubes: MWCNTs) โดยอนุภาคนาโนของโลหะเงินจะถูกสร้างขึ้นจากสารละลายซิลเวอร์ในเตรตที่มีน้ำและยึดติดอย่างทันทีทันใด ทำให้พื้นผิวมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์นูนออกมาในสถานะอุณหภูมิจึง โดยปราศจากสารรีดิวซ์หรือการทำฉายรังสีและรูปแบบผลิตภัณฑ์ของมัลติวอลล์คาร์บอน นาโนทิวป์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิล นาโนไฮบริด จะสังเกตได้จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) และสมบัติศักย์ไฟฟ้าเคมีของมัลติวอลล์คาร์บอน นาโนทิวป์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิล นาโนไฮบริดที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทองซึ่งจะแสดงลักษณะพิเศษ โดยการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าและผลจากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าตัวเซ็นเซอร์นี้มีความสามารถเป็นตัวเร่งสำหรับเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งผลของตัวเซ็นเซอร์นั้นสามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0.05–17 มิลลิโมลาร์ ด้วยค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 5×10^{-7} โมลาร์ ที่อัตราส่วนระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เท่ากับ 3 และสภาพไวของสัญญาณสามารถคำนวณได้เท่ากับ 1.42 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.2 โวลต์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ามีความเที่ยงตรงที่ดี มีความเสถียรที่ยาวนานและปราศจากสิ่งรบกวนของกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid (AA)) กรดยูริก (uric acid (UA)) และอะเซตามิโนเฟน (acetaminophen (AP))

Xinhuang Kang และคณะ [45] กลุ่มของนาโนคอปเปอร์เคลือบบนชั้นฟิล์มของแนฟฟิออน-ซอลูบิไรซ์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (nafion-solubilized multiwall carbon nanotube: CNTs) โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแล้วนำไปปรับแต่งผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่เรียกว่า “คอปเปอร์-ซีเอ็นทีเอสคอมโพสิตเซ็นเซอร์” (Cu-CNTs composite sensor: Cu-CNTs-GCE) ซึ่งใช้ตรวจวัดกลูโคสโดยไม่ใช้เอนไซม์และมีการศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) ไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry: CV) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (electrochemical impedance spectroscopy: EIS) โดยผลทดลองการตรวจวัดกลูโคสจะสามารถตรวจได้ในช่วงความเข้มข้น $7.0 \times 10^7 - 3.5 \times 10^3$ โมลาร์ ด้วยสภาพไว 17.76 ไมโครแอมแปร์เมตรต่อโมลาร์ ที่ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 2.1×10^7 โมลาร์ ภายในเวลาเพียง 5 วินาที ซึ่งคุณสมบัติที่ได้คือ ความไวในการตรวจวัดสูง เสถียรภาพสูง ความเที่ยงตรงในการตรวจวัดที่และตอบสนองได้เร็ว ไม่เกิดสัญญาณรบกวนด้วย โดยจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปทำระบบแอมเพอโรเมตริกไบโอเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดกลูโคสในตัวอย่างเลือดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kuei-Sheng Tseng และคณะ [46] ได้ศึกษาการใช้ปรุสเซียนบลู (prussian Blue: PB) ปรับปรุงขั้วสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งฟิล์มบางปรุสเซียนบลูจะถูกทำการพอกพูนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrodeposition) คือ การทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (galvanostatic) บนขั้วสเตรตกรจกฟลูออรีนทินออกไซด์ (fluorine doped tin oxide: FTO) ซึ่งมีความนำเชื้อถือและความเที่ยงตรงในการตรวจวัดโดยการใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คงที่ เท่ากับ -0.2 โวลต์ (เปรียบเทียบกับขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์/โพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัว (Ag/AgCl/saturated KCl) ด้วยขั้วฟลูออรีนทินออกไซด์จะปรับปรุงด้วยปรุสเซียนบลูที่จุ่มลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ 0.1 โมลาร์ของโพแทสเซียมคลอไรด์ที่พีเอชเท่ากับ 2 โดยช่วงของการตรวจวัด จะถูกพบระหว่าง 50 โมลาร์ถึง 50 มิลลิโมลาร์ และสภาพไวเท่ากับ 58.1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โมลาร์แต่จะถูกสังเกตว่า สามารถละลายออกซิเจน ซึ่งเป็นสิ่งรบกวนของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และผลของการตรวจวัดจะดีขึ้นได้นั้น จะสามารถทำได้โดยการนำสารละลายไปพ่นด้วยแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการกำจัดสิ่งรบกวนในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการใช้แพททินัมหรือใช้กลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยปรุสเซียนบลู

Po-Hsun Lo และคณะ [47] ได้ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าเคมีและศึกษาลักษณะพิเศษของการทำไบโอเซ็นเซอร์ใหม่ของ โครงสร้างอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (nano-titanium dioxide: TiO_2) และกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (deoxyribonucleic acid: DNA) ซึ่งมีตัวกลางของปฏิกิริยารีดอกซ์คือ ธิโอนิน (thionin: TN) โดยจะถูกทำการพอกพูนไปยังดีเอ็นเอ/นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (DNA/nano- TiO_2) ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน (glassy carbon electrode: GCE) โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เป็นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope: AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) จะสามารถวิเคราะห์หาพื้นผิวของฟิล์มธิโอนิน/ดีเอ็นเอ/นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TN/DNA/nano- TiO_2) และไบโอเซ็นเซอร์ ธิโอนิน/ดีเอ็นเอ/นาโนไททาเนียมไดออกไซด์/ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน (TN/DNA/nano- TiO_2 /GCE) ซึ่งจะแสดงการวัดในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดีเยี่ยมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน (O_2) แล้วจะแสดงการวิเคราะห์ในส่วนของการกำหนดแอมเพอโรเมตริกของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ การลดศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินลง (-0.2 โวลต์) แล้วค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดและช่วงการเทียบมาตรฐานเชิงเส้นเท่ากับ 0.05 มิลลิโมลาร์ (ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เท่ากับ 3) และ 0.05 – 22.3 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ โดยธิโอนิน/ดีเอ็นเอ/นาโนไททาเนียมไดออกไซด์/ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนจะแสดงความคงตัวและความเที่ยงตรงในการวิเคราะห์ปฏิกิริยารีดอกซ์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วไบโอเซ็นเซอร์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังจะสามารถใช้ระบบแอมเพอโรเมตริก ไบโอะเซ็นเซอร์สำหรับการกำหนดความแน่นอนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างได้อีกด้วย

Carmen Quintana และคณะ [48] ขั้วไฟฟ้าวัสดุสามารถเตรียมได้จากการใช้ขั้วทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (fluoride doped tin oxide: FTO) ที่จะทำการปรับปรุงกับฟิล์มบางที่มีพื้นที่รูพรุนสูงของพวกโลหะออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ โดยในการงานวิจัยนี้ได้ใช้พวกโลหะออกไซด์ 3 ชนิดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นสารที่ใช้วิเคราะห์และผลกระทบของโลหะออกไซด์และอนุภาคนาโนของโลหะทองคำจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและการแสดงสัญญาณของการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาได้จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy: TEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้การสะท้อนแสงแบบกระจาย (diffuse reflectance spectroscopy: DRS) และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical techniques) โดยการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะแสดงให้เห็นว่า อนุภาคแมกนีเซียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าการปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ อย่างไรก็ตามการตอบสนองของเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีของขั้วเหล่านี้จะแสดงถึงการถ่ายเทมวลซึ่งมาจากลักษณะความเป็นรูพรุนที่สูงของวัสดุ (ค่าพื้นที่บลูเนอร์-เอลเม็ทเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller (BET)) เท่ากับ 125 ตารางเมตรต่อกรัม) และสมบัติการซินเทอริง (Sintering) ที่ดีของอนุภาคนาโนไทเทเนียมจะให้ผลในเรื่องความทนทานของฟิล์มที่จะสามารถยึดติดกับขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของการใช้งานจะมีความเชื่อถือของผลการทดลองได้และมีเที่ยงตรงมาก

Chia-Yu Lina และคณะ [49] ได้ศึกษาทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (fluorine doped tin oxide: FTO) ที่ถูกดัดแปลงด้วยอนุภาคนาโนเงินออกไซด์และอนุภาคนาโนของโลหะเงิน ($\text{AgNPs}/\text{ZnONRs}/\text{FTO}$) เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่จะนำมาทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมตริ (chronoamperometry) ซึ่งขั้นแรกจะเป็นขั้นของซิงค์ออกไซด์ ได้จากกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าและทำการเคลือบชั้นของโลหะเงินภายใต้สภาวะของรังสียูวี เพื่อให้ได้เป็นไอออนของเงินแล้วจึงเคลือบบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยในอัตราที่เหมาะสมในการเคลือบอนุภาคโลหะเงินออกไซด์ ซึ่งจะสามารถควบคุมโดยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีเพื่อให้มีพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคนาโนของโลหะเงินที่จะมากระจายตัวอีกชั้นหนึ่ง ส่วนปริมาณของอนุภาคนาโนของโลหะเงินนั้นจะกำหนดโดยการควบคุมเวลาในการฉายรังสียูวี ที่ให้เข้าไปกับอนุภาคนาโนของโลหะเงิน ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าขั้วไฟฟ้าที่สังเคราะห์นั้น สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้และผลจากการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบจากข้อไฟฟ้าที่ไม่ได้เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของโลหะเงิน ซึ่งมีเฉพาะชั้นของซิงค์ออกไซด์เท่านั้นและจากการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโครโนแอมเปอร์อิมเมทรี จะต้องให้ศักย์ไฟฟ้า -0.55 โวลต์ และให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.9 ไมโครโมลาร์ (ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3) แล้วสภาพไวในการตรวจวัดที่ 152.1 มิลลิแอมแปร์ต่อโมลาร์ ตารางเซนติเมตร ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.983 มิลลิโมลาร์ และเวลาที่ตอบสนองในการตรวจวัดเท่ากับ 30-40 วินาที ซึ่งการตรวจคุณลักษณะของข้อไฟฟ้าจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (energy dispersive X-ray: EDX) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope: TEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (cyclic voltammetry: CV) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ซึ่งทดสอบคุณสมบัติของข้อไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

Yali Li และคณะ [50] ส่วนผสมของอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ (gold nanoparticles: AuNPs) ที่เป็นสารตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์ (manganese dioxide nanoparticles: Nano-MnO₂) สำหรับการพัฒนาตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโครโนแอมเปอร์อิมเมทรี (chronoamperometry) โดยส่วนผสมนี้จะเตรียมได้จากการผสมโดยตรงของกรดซิติริก อนุภาคนาโนของโลหะทองคำ พอลิ(อัลลิลเอไมด์ ไฮโดรคลอไรด์) (poly(allylamine hydrochloride): PAH) และอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งจะใช้เทคนิควิธีการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะที่รวมตัวเอง (electrostatic self-assembly) แล้วตัวเซ็นเซอร์นี้จะแสดงศักย์ไฟฟ้าเคมีได้อย่างดีเยี่ยมในช่วง 7.80×10^{-7} โมลาร์ ถึง 8.36×10^{-4} โมลาร์ ที่ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 4.68×10^{-8} โมลาร์ (ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3) ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลการทำงานร่วมกันระหว่างความสามารถตัวเองปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์และความสามารถในการนำไฟฟ้าของอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในยาเสพติดได้ด้วย

K.K. Purushothaman และคณะ [51] ได้ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าเคมีและโครงสร้างของฟิล์มของทินออกไซด์ (SnO₂) ที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) บนฟลูออรีนและใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform IR spectrometer: FTIR) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มทินออกไซด์ต่อฟลูออรีน ที่เคลือบบนกระจก ซึ่งจะทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (hall) และค่าความต้านทาน โดย 7.5% ของฟิล์มจะให้ค่าความต้านทาน ค่าความหนาแน่น และค่าโมบิลิตี เท่ากับ 15×10^{-4} โอห์ม 18.7×10^{19} กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 21.86 ตารางเซนติเมตรต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์วินาทีตามลำดับและนิกเกิลออกไซด์ที่เคลือบบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีน จะมีคุณสมบัติเป็น อิเล็กโตรโครมิก (electrochromic) ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNT; เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 110 - 170 นาโนเมตร ยาว 5 - 9 ไมโครเมตร ของบริษัท Aldrich chemistry, Japan)

3.1.2 โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Sodium dihydrogen phosphate monohydrate; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$: มวลโมเลกุล 156.01 g/mol ของบริษัท Carlo Erba Reagents, Italy)

3.1.3 ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตโดเดคาไฮเดรต (Di-Sodium hydrogen orthophosphate dodecahydrate; $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: มวลโมเลกุล 358.14 g/mol ของบริษัท Fisons Scientific Equipment, England)

3.1.4 แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas; N_2 ความบริสุทธิ์ 99.999% v/v ของบริษัท TIG, Thailand)

3.1.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2 ความเข้มข้น 30% (w/v) บริษัท Fisher Scientific)

3.1.6 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl : มวลโมเลกุล 36.46 g/mol ความเข้มข้น 36.5% (v/v) ของบริษัท Carlo Erba Reagents, Italy)

3.1.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH : มวลโมเลกุล 39.997 g/mol ความบริสุทธิ์ >97% ของบริษัท RANKEM, India)

3.1.8 โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอไรต์ (Potassium hexacyanoferrate (III); $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$: มวลโมเลกุล 329.26 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% ของบริษัท MERCK)

3.1.9 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride; KCl : มวลโมเลกุล 74.55 g/mol ความบริสุทธิ์ >97% ของบริษัท UNIVAR)

3.1.10 สารละลายแนฟฟิออน (Nafion solution: ความหนาแน่น 0.87 g/cm³ ความเข้มข้น 5% ละลายในแอลกอฮอล์และน้ำปริมาตร 25 มิลลิลิตร ของบริษัท Fluka)

3.1.11 เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: ความหนาแน่น 0.79 g/cm³ มวลโมเลกุล 46.07 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.5% ของบริษัท Carlo Erba Reagents, Italy)

3.1.12 เมทานอล (Methanol; CH_3OH : ความหนาแน่น 0.79 g/cm³ มวลโมเลกุล 32.04 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.9% ของบริษัท Erba Reagents, SPA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.13 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide solution; NH_4OH : มวลโมเลกุล 35.04 g/mol ความหนาแน่น 0.88 g/cm³ ความบริสุทธิ์ 99.9% ของบริษัท Erba Reagents, SPA)

3.1.14 กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3 : มวลโมเลกุล 63.01 g/mol ความหนาแน่น 1.42 g/cm³ ความเข้มข้น 69% ของบริษัท BDH laboratory supplies)

3.1.15 กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid; H_2SO_4 : มวลโมเลกุล 98.078 g/mol ความหนาแน่น 1.835g/cm³ ความเข้มข้น 96% ของบริษัท Erba Reagents, SPA)

3.1.16 น้ำกลั่นปราศจากไอออน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

3.2.1 ซิลเวอร์อิงค์ (Silver Ink): Electrodag 479SS, Acheson USA

3.2.2 คาร์บอนอิงค์ (Carbon Ink): Electrodag PF-407C, Acheson USA

3.2.3 ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์อิงค์ (Silver/Silver chloride Ink): Electrodag 7019, AchesonUSA

3.2.4 สีนํ้ามันสำหรับชั้นฉนวน (Insulator): Chaiyabon Brother (Thailand)

3.2.5 แผ่นพีวีซี (PVC Substrate) หนา 0.4 มิลลิเมตร

3.2.6 ยางซิลิโคน (Silicone rubber)

3.2.7 ผ้าสกรีนเบอร์ 140T

3.2.8 เฟรมสกรีนสำหรับพิมพ์สกรีนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่สร้างขึ้น

3.3.2 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine dope-tin oxide; FTO) เคลือบบนผิวกระจกที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้า ประมาณ 8 Ω /square ค่าการส่องผ่าน 65% ของบริษัท Solaronix, Switzerland

3.3.3 เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (Autolab Potentiostat); รุ่น PGSTAT20 ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.3.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffer furnace) ของบริษัท fisher scientific, UK

3.3.5 ตู้อบสารเคมี (Hot air oven) รุ่น UNB 400 ของบริษัท Memmert, Germany

3.3.6 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance); รุ่น BP 210 D ของบริษัท SCIENTIFIC PROMOTION, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็กกวน รุ่น 728 stirrer ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3.3.9 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD)

3.3.10 ไมโครปิเปตต์ (Micro pipette) ขนาด 10 ถึง 100 ไมโครลิตร ของบริษัท WITEG LABORTECHNIK)

3.3.11 ไมโครปิเปตต์ (Micro pipette) ขนาด 20 ถึง 200 ไมโครลิตร บริษัท THERMO FISHER SCIENTIFIC

3.3.12 ไมโครปิเปตต์ (Micro pipette) ขนาด 100 ถึง 1000 ไมโครลิตร บริษัท VIPRO

3.3.13 กระจกชนิดน้ำ

3.3.14 บีกเกอร์ ขนาด 10, 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร

3.3.15 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 10, 25, 50, 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร

3.3.16 กระจกดวงขนาด 10, 25, 50 และ 100 มิลลิลิตร

3.3.17 ปิเปตต์ ขนาด 1, 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร

3.3.18 หลอดหยด

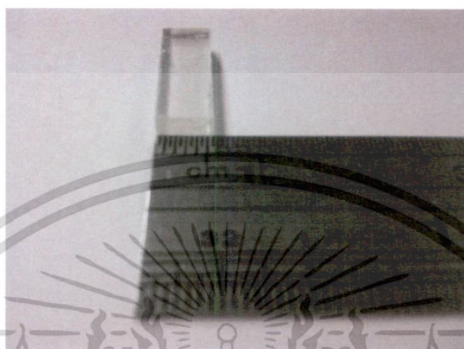
3.3.19 ครุฑีเบิล (Crucible) รุ่น 101/40 DIN ของบริษัท HCT, Germany

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีทำการวิจัย

3.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์

ตัดขั้วให้มีขนาดความกว้าง 0.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร จากนั้นวัดความยาวจากขอบขั้วให้มีขนาด 0.5 เซนติเมตร ไว้สำหรับจุ่มลงในสารละลาย



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้ากว้าง 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้ายาว 1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.3 ขั้วไฟฟ้ายาว 0.5 เซนติเมตร สำหรับจุ่มสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

3.4.2.1 เตรียมแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC Rigid sheet) โดยตัดให้มีขนาดตามต้องการของเฟรมสกรีน ทำความสะอาดแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์จากนั้นล้างด้วยเอทานอล ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์มาทำการสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้

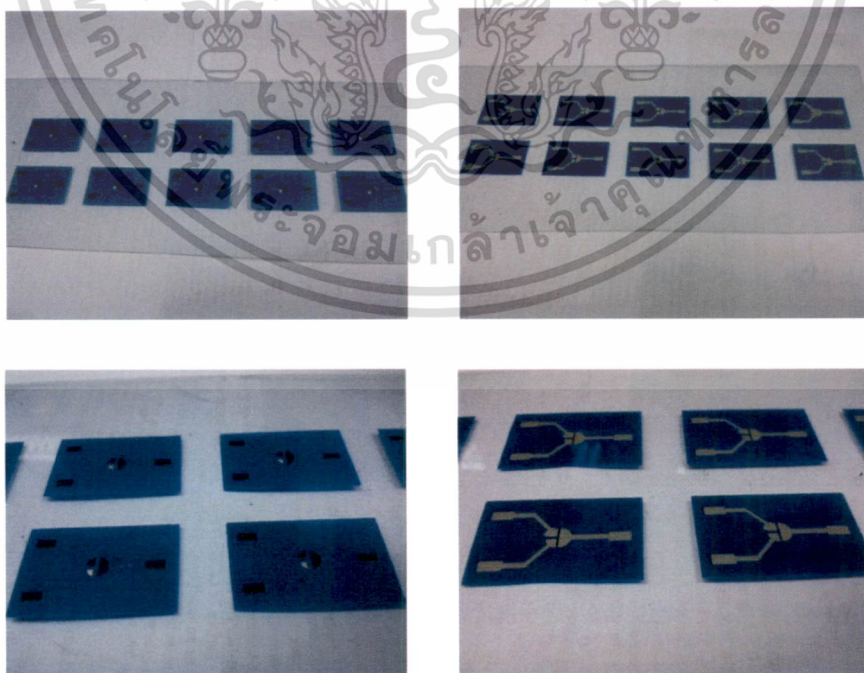
3.4.2.2 ทำการสกรีนลายขั้วนำไฟฟ้า (Conducting track) ด้วยหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink)

3.4.2.3 ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) และลายขั้วนำไฟฟ้า (Conducting track) ด้วยหมึกคาร์บอน (Carbon Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกคาร์บอน (Carbon Ink)

3.4.2.4 ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ด้วยหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver/Silver chloride Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver/Silver chloride Ink)

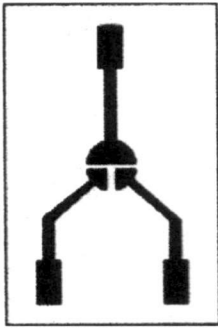
3.4.2.5 ทำการสกรีนลายฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ด้วยสีน้ำมัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายที่ในสีน้ำมัน

หมายเหตุ: ก่อนใช้งาน ต้องทำการคัดเลือกขั้วไฟฟ้า โดยการเช็คลายวงจรด้วยมัลติมิเตอร์

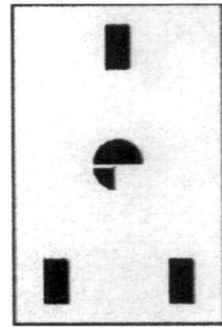


รูปที่ 3.4 ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นคาร์บอนพิมพ์สกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลาย Conducting track



ลายขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย



ลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิง



ลาย Insulator

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะชั้นต่างๆ ที่สกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.4.3.1 การล้างมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ชั่งมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 200 มิลลิกรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปรีฟลักซ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนได้ pH 7 นำไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปเก็บใน โถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

3.4.3.2 การเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

นำมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ล้างแล้ว 20 มิลลิกรัม เติมสารละลายนิกเกิล - อะซีเตตที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไป sonicated เป็นเวลา 30 นาที นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง นำไปเก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

3.4.3.3 การเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เตรียมสารแขวนลอยของวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยนำวัสดุผสมของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมได้มา 2 มิลลิกรัม ผสมกับสารละลายแอมโมเนียมเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไป sonicated เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารแขวนลอยสีดำ

3.4.3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่เตรียมไว้จาก 3.4.1 มากำหนดพื้นที่ที่ต้องการเคลือบด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยกำหนดพื้นที่หน้าขั้วขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร จากนั้น ปิเปตต์สารแขวนลอยของวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มา 10 ไมโครลิตร ลงบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.4.4.1 ศึกษาลักษณะรูปร่างของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์มาศึกษารูปร่างลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.4.2 ศึกษาลักษณะรูปร่างของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาศึกษารูปร่างลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.4.3 การศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD)

นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์มาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

3.4.4.4 การศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ บนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD)

นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

3.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

ทำการศึกษาประสิทธิภาพและคุณสมบัติในการตรวจวัดทางเทคนิคเคมีไฟฟ้าด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบด้วยเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (Autolab Potentiostat PGSTAT20) สารละลายที่ใช้คือ สารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Potassium hexacyanoferrate; $K_3 [Fe (CN)_6]$) กับ โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride; KCl) ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปีเปตต์สารละลายผสมปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วจ่ายศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 ถึง +1.00 โวลต์ จำนวน 5 รอบ ด้วยอัตราการสแกน 50 mV/s

3.4.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ซึ่งจะศึกษาสภาวะต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.4.6.1 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษานิกของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์เปล่า ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

3.4.6.2 การศึกษาผลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษานิกของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนปริมาณมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

3.4.6.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต ในการตรวจวัด

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต ($\text{Ni}[\text{CH}_3\text{COO}]_2$) เป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลาร์ ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี

3.4.6.4 การศึกษาผลของ pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ในการตรวจวัด

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 6.0, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 7.0, 7.1, 7.2 และ 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี

3.4.6.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอฟฟิออน ในการตรวจวัด

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอฟฟิออนที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแอฟฟิออนเป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอย ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี

3.4.6.6 การศึกษาผลของปริมาตร ของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่ง ปรับเปลี่ยนปริมาตร 5.0, 10, 15.0 และ 20.0 ไมโครลิตร ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

3.4.6.7 การศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยา ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) โดยปรับเปลี่ยน อัตราการสแกน 10, 25, 50, 100, 250, 500 และ 1000 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสที่ได้ดูความเป็นเส้นตรงของกราฟที่ได้

3.4.6.8 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Linear range)

ทำการหาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี โดยให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ซึ่งใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ บีเปิดต่อลงไป 10 ไมโครลิตร ทุกๆ 50 วินาที และบันทึกวนสารละลายตลอดที่ทำการทดลอง จากนั้น ทำการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ตรวจวัดได้โดยจะเปรียบเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.4.6.9 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Limit of detection)

ทำการศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการศึกษาปริมาณของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่น้อยที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยอาศัยกราฟมาตรฐานในการทดลองที่ 3.4.6.8 ซึ่งจะเปรียบเทียบขีดจำกัดของการวิเคราะห์ระหว่างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.4.6.10 ศึกษาค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)

ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี 20 ซ้ำ (ทุกครั้งที่มีการเตรียมขั้วไฟฟ้าใหม่) บันทึกค่ากระแสที่ได้แล้วนำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

3.4.6.11 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Life time)

ทำการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) บันทึกค่ากระแสที่ได้

3.4.6.12 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างได้แก่น้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6% w/v 2 ตัวอย่าง และน้ำยาย้อมผม 2 ตัวอย่าง ไปตรวจวัดด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี โดยการเติมสารละลายมาตรฐาน (Standard addition method) ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์ในการตรวจวัด และคงที่ศักย์ไฟฟ้าไว้เท่ากับ 0.75 โวลต์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยปิเปตต์สารละลายตัวอย่างลงไป 10 ไมโครลิตร ที่มีการปั่นกวาสารละลายตลอดทำการทดลอง ต่อมาเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 – 2.2 มิลลิโมลาร์ลงไปในตัวอย่างเช่นเดียวกัน โดยในแต่ละความเข้มข้นจะเติมลงไปปริมาณ 10 ไมโครลิตร แล้วตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะปรากฏเป็นแอมเพอโรแกรม จากนั้น นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อจะไปคำนวณหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างไม่ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6.13 การวิเคราะห์ค่าการคืนกลับ (% Recovery)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารตัวอย่างได้แก่ น้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 % w/v 2 ตัวอย่าง และน้ำยาข้อมผสม 2 ตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์ในการตรวจวัดและคงที่ศักย์ไฟฟ้าไว้เท่ากับ 0.75 โวลต์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยเปิดสารละลายตัวอย่างลงไป 10.00 ไมโครลิตร ที่มีการปั่นกวนสารละลายตลอดทำการทดลอง ต่อมาเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 – 2.2 มิลลิโมลาร์ ลงไปในตัวอย่างเช่นเดียวกัน โดยในแต่ละความเข้มข้นจะเติมลงไปปริมาณ 10 ไมโครลิตร แล้วตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะปรากฏเป็นแอมเพอโรแกรม จากนั้น นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

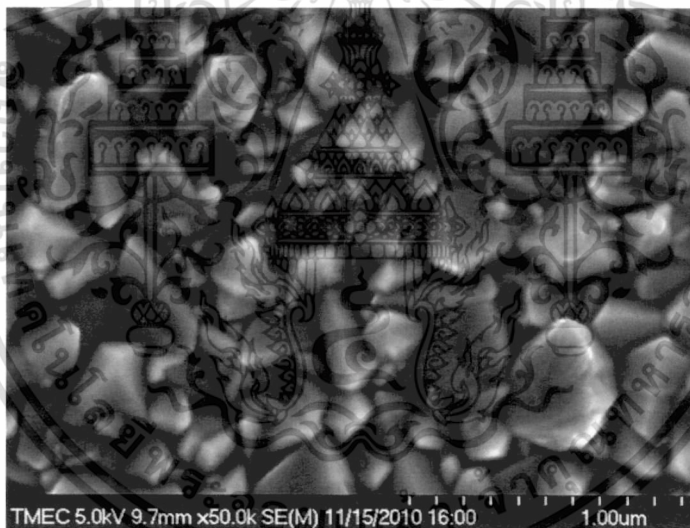
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วย นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

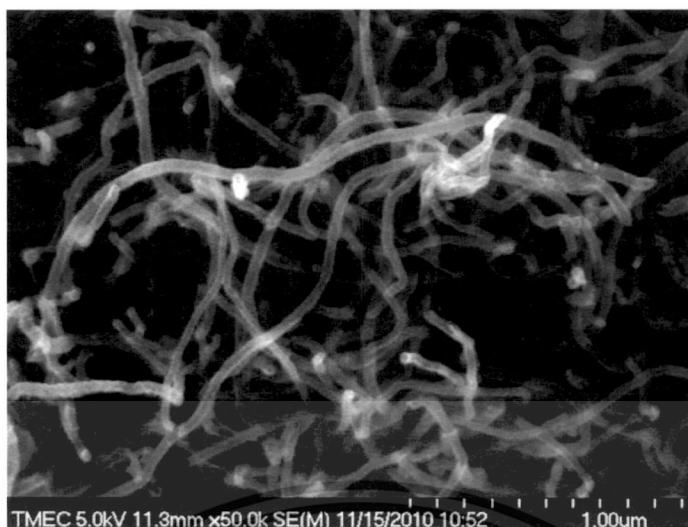
4.1.1 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะพบลักษณะทางกายภาพบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ดังรูป 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่าของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์



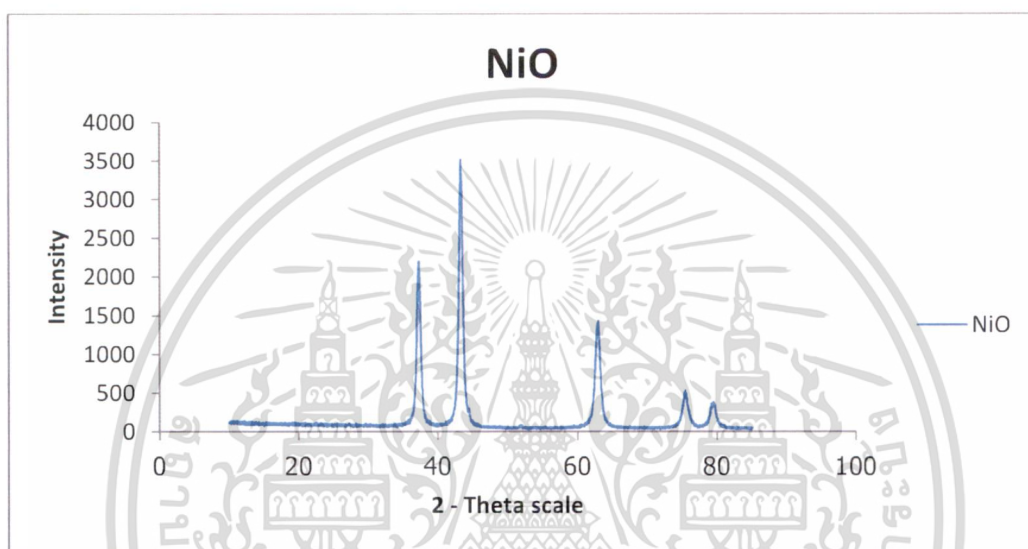
รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการปรับแต่งหน้าขั้วที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจากรูปที่ 4.3 พบว่าการกระจายตัวของนิเกิลออกไซด์บนผิวหน้าของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

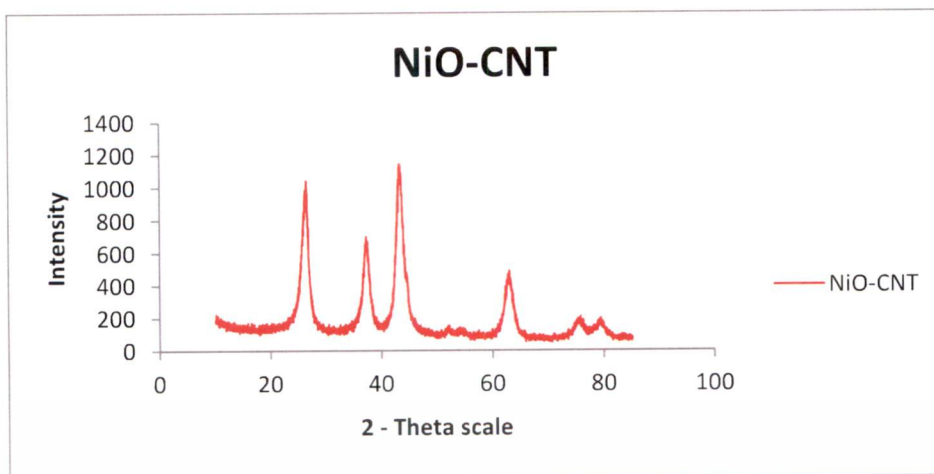
4.1.2 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตรต 0.2 โมลาร์ และใช้ปริมาณมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 20 มิลลิกรัม จะพบลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของนิกเกิลออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

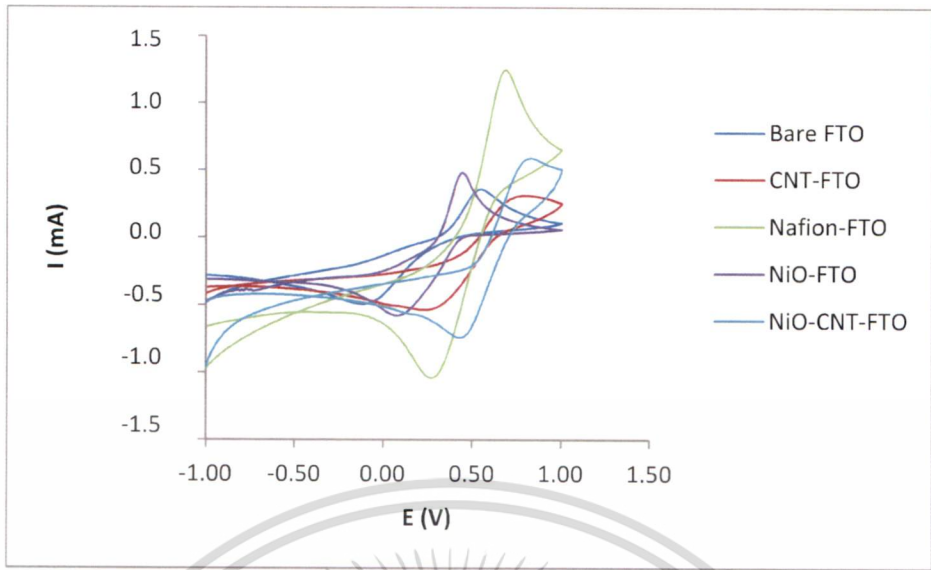
จากการเคลือบปรับปรุงบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตตที่ใช้เตรียมเท่ากับ 0.2 โมลาร์ และปริมาณของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะปรากฏพีกที่มุมตกกระทบ 2θ เท่ากับ 37.24° , 43.29° , 62.84° และ 75.41° ซึ่งระบุ (003) (012) (104) และ (015) ตามลำดับ ซึ่งเป็นระนาบผลึกของนิกเกิลออกไซด์ และพีกที่จากรูปที่ 4.5 สามารถยืนยันจากกราฟได้ว่าอนุภาคที่มาเกาะบนผลึกทินออกไซด์เจือฟลูออรีน คือ นิกเกิลออกไซด์ 26.22° (002) เป็นระนาบผลึกของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์เทียบกับขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยนำไปตรวจวัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 30 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยไซคลิกโวลแทมโมแกรม ดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



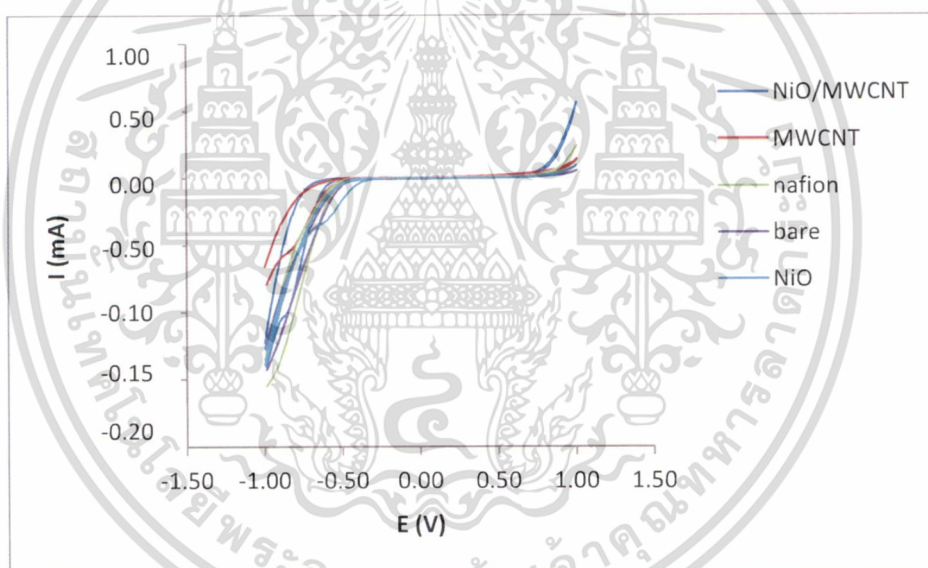
รูปที่ 4.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยแนฟิออน มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นิกเกิลออกไซด์ และไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 3.0 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 mV/s

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ แต่จะพบว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะให้ค่าการเกิดปฏิกิริยาที่สูงทั้งนี้เนื่องมาจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี

4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์เทียบกับขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยแนฟิออน มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยนำไปตรวจวัดด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 mV/s ไชคลิกโวลแทมโมแกรม ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 mV/s

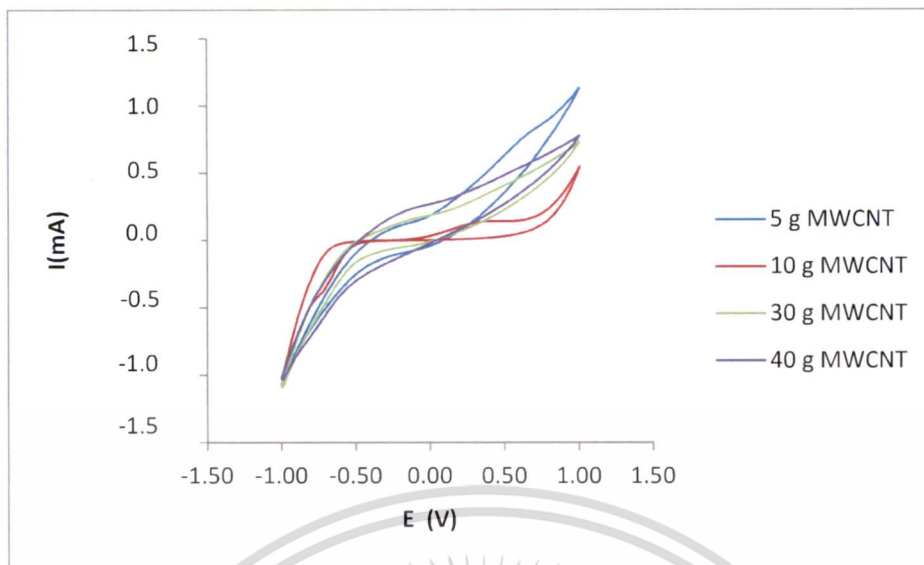
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมรูปที่ 4.7 ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยสแกนศักย์ในช่วง -1.00 ถึง 1.00 โวลต์ สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันประมาณ 0.75 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเท่ากับ -0.75 โวลต์

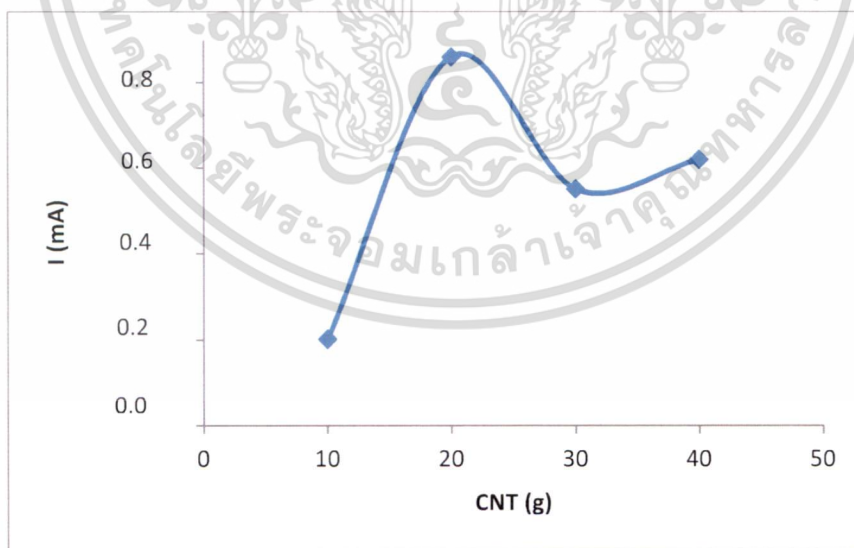
จากนั้นเมื่อนำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ไปปรับปรุงด้วยมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์และนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะให้ค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ แต่ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่สูงที่สุดเนื่องมาจากคุณสมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.5% เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลการศึกษาปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนปริมาณมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็น 10 , 20 , 30 และ 40 มิลลิกรัม ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง $+1.00$ โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็น 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัม ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s



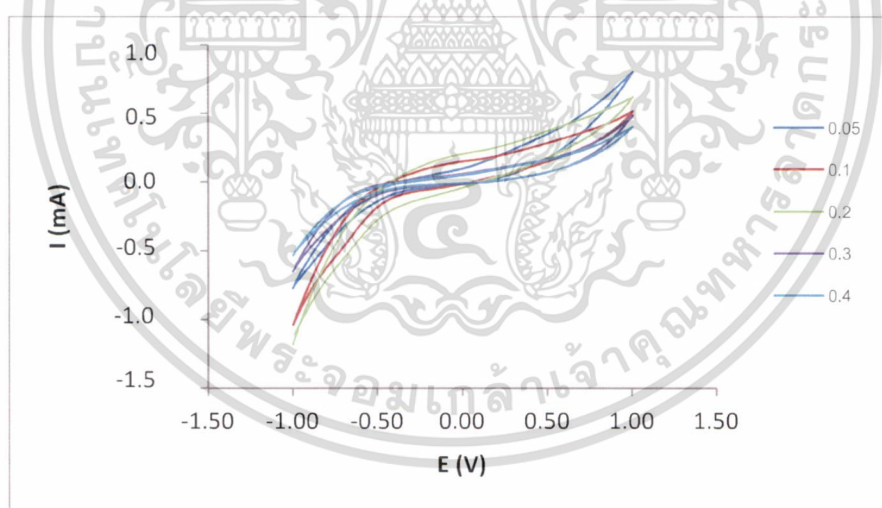
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะพบว่าปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการปรับแต่งขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ คือ 20 มิลลิกรัม ต่อความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต 0.2 โมลาร์ ให้ค่ากระแสออกซิเดชันที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่าปริมาณมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 20 มิลลิกรัม

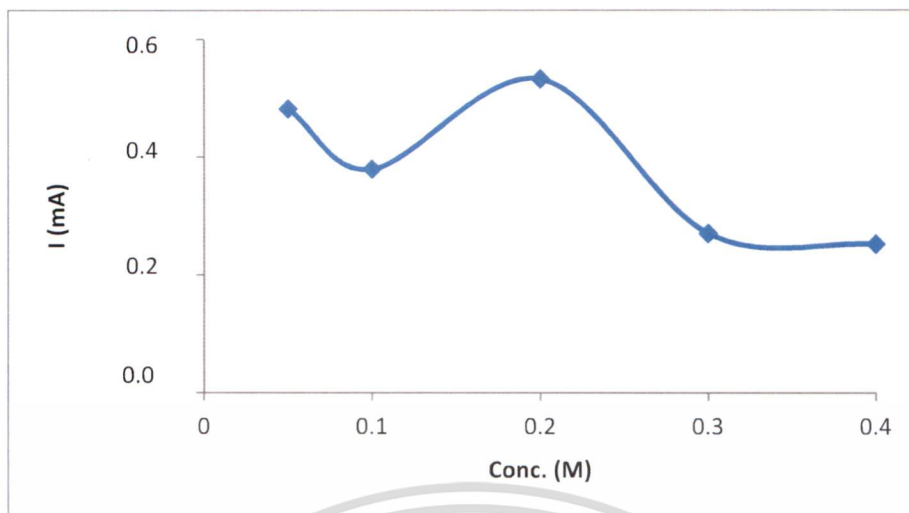
4.3.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นนิกเกิลอะซีเตตในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลการศึกษาปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต ($\text{Ni}[\text{CH}_3\text{COO}]_2$) เป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลาร์ ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต ($\text{Ni}[\text{CH}_3\text{COO}]_2$) เป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลาร์ ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



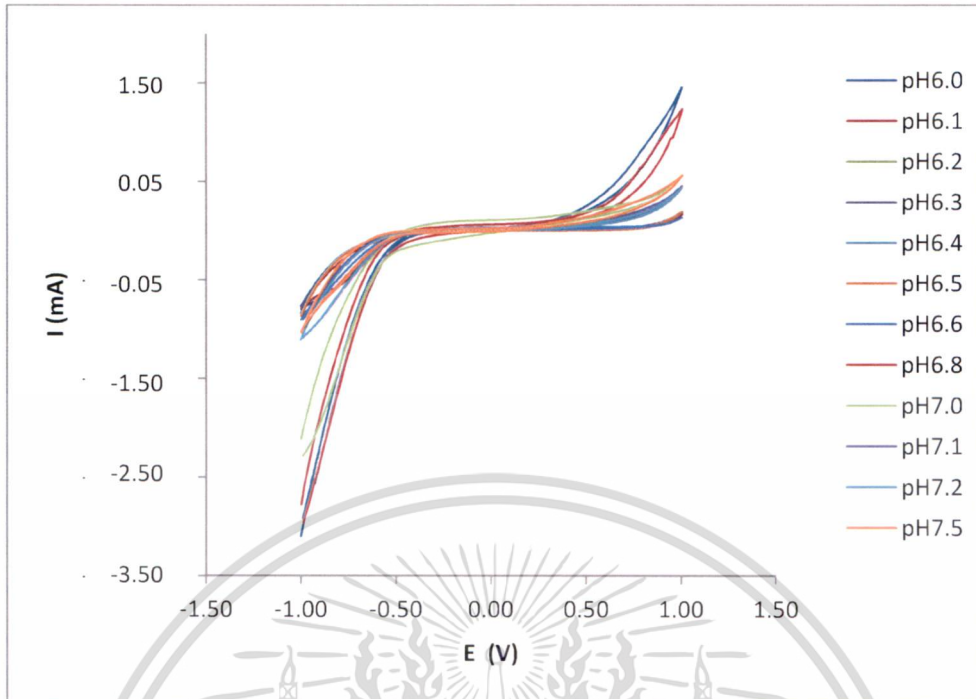
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตต

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะพบว่าปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการปรับแต่งขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์คือ 0.2 โมลาร์ เมื่อกำหนดให้ปริมาณของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม ให้ค่ากระแสออกซิเดชันที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่าความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตตเท่ากับ 0.2 โมลาร์

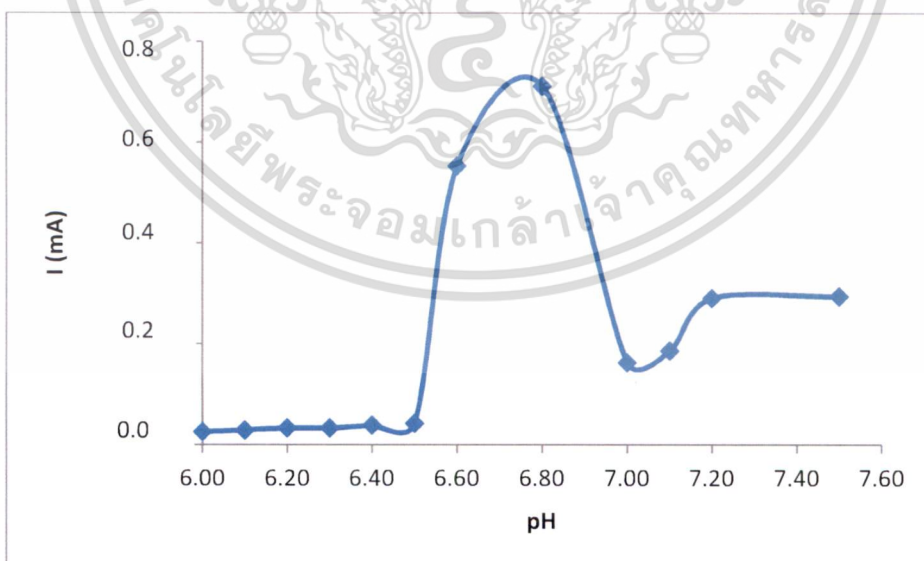
4.3.4 ผลการศึกษาผลของ pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลจากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 6.0, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 7.0, 7.2, 7.4, 7.5, 7.8 และ 8.0 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เพื่อศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่า pH ต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยน pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่ pH ต่างๆ ได้แก่ pH 6.0, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 7.0, 7.1, 7.2 และ 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่

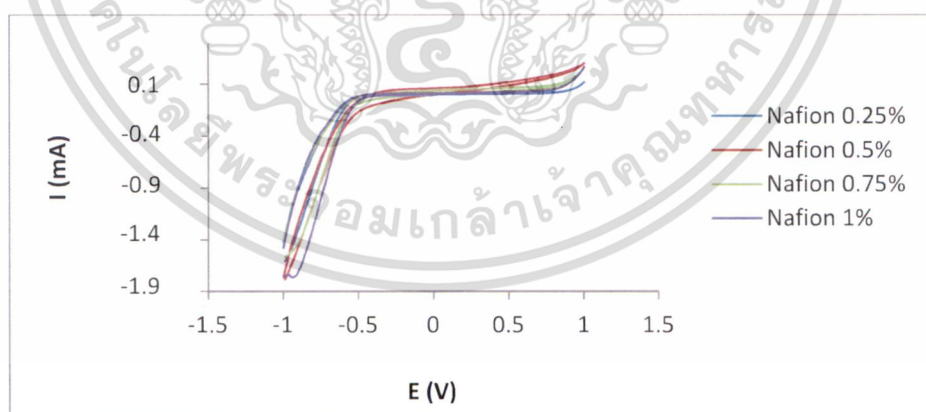
ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ ให้ฟีกออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกันและค่ากระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยเมื่อสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์มีค่าเป็นกลางจะทำให้กระแสออกซิเดชันมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าที่ค่า pH ระหว่าง 6.8 ถึง 7.0 การแตกตัวจะสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์มีความเป็นกรดหรือเป็นเบสมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าที่ค่า pH เท่ากับ 6.8 จะให้ค่ากระแสที่สูงที่สุดดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่า pH ของฟอสเฟตบัฟเฟอร์เท่ากับ 6.8

4.3.5 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออน ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

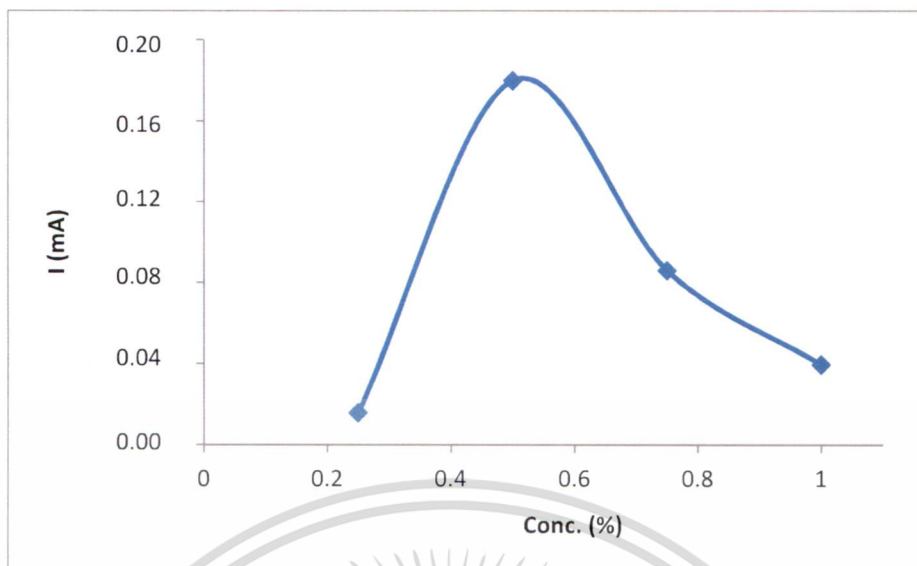
ผลจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออนที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า ซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออนเป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอย ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้า

ฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออน ในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



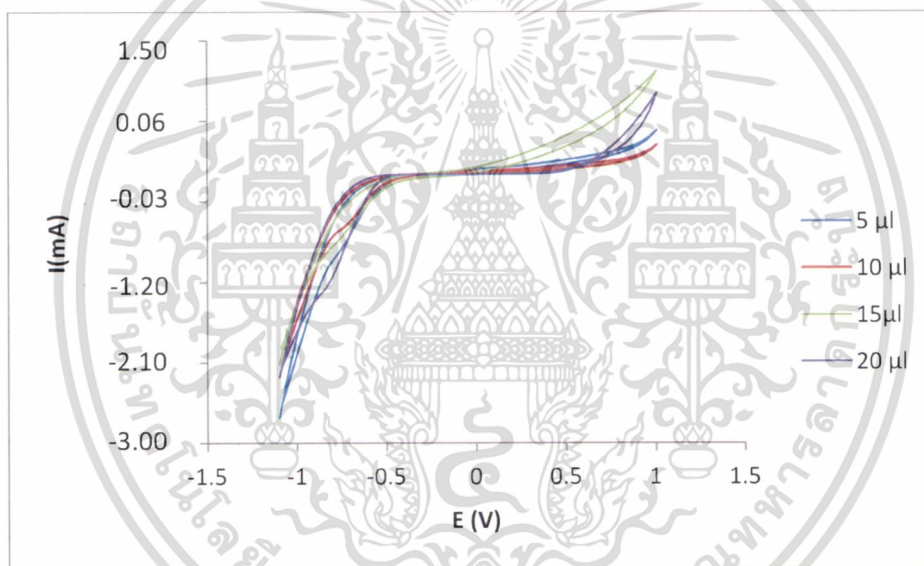
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายแอฟีออนในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น สารละลายแอฟีออนมีความสำคัญในการปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเป็นสารที่ช่วยยึดวัสดุผสมให้ติดอยู่บนหน้าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ดังนั้นการหาความเข้มข้นของแอฟีออนในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะถ้าความเข้มข้นของแอฟีออนมากเกินไปจะทำให้หน้าขั้วไฟฟ้าเกิดเป็นฟิล์มปกคลุมหน้าขั้วไฟฟ้าทำให้การนำไฟฟ้าลดลง และถ้าความเข้มข้นน้อยเกินไปจะทำให้วัสดุที่เคลือบบนหน้าขั้วไฟฟ้านั้นหลุดได้ง่าย จากการทดลองนี้พบว่าที่ ความเข้มข้นของแอฟีออน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดและไม่ทำให้วัสดุผสมไม่หลุดออกจากขั้วไฟฟ้าได้ง่าย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าความเข้มข้นของแอฟีออนเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

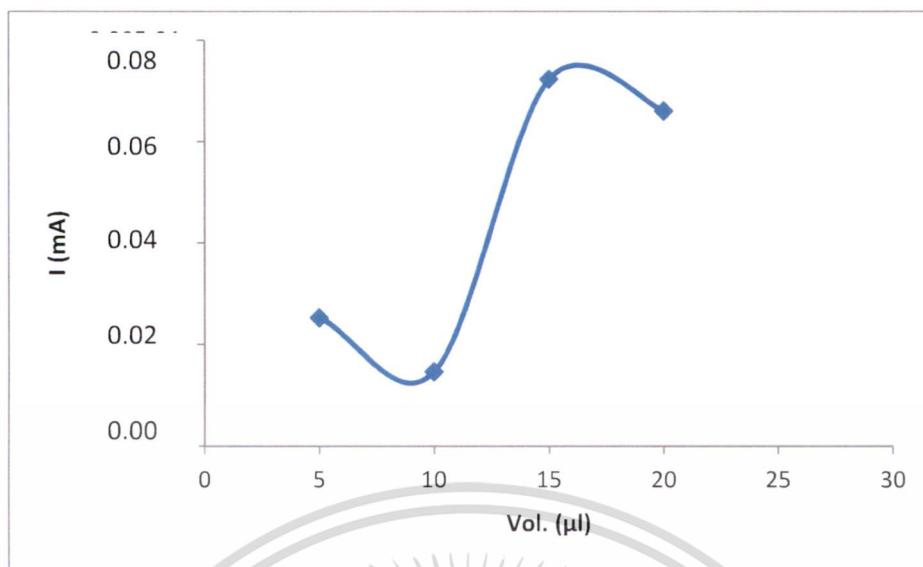
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ผลการศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลจากการศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าซึ่งปรับเปลี่ยนปริมาตร 5, 10, 15 และ 20 ไมโครลิตร ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อปรับแต่งบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ดังแสดงในรูป 4.16



รูปที่ 4.16 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น 5, 10, 15 และ 20 ไมโครลิตร เมื่อกำหนดความเข้มข้นของแนฟฟิออนเท่ากับ 0.5 %



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารแขวนลอยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็น 5, 10, 15 และ 20 ไมโครลิตร

ปริมาตรของสารแขวนลอยในการเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่กำหนดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่ต้องการปรับแต่งเป็น 5 ตารางมิลลิเมตร ปริมาตรที่เหมาะสมที่ใช้หยดบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมไว้จึงควรมีปริมาตรที่เหมาะสมเนื่องจากหากมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้แขวนลอยนั้นล้นออกมาจากพื้นที่ที่เกิดความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ และถ้าหากน้อยเกินไปจะทำให้พื้นที่ในการปรับแต่งขั้วไฟฟ้าที่เตรียมไว้มีปริมาณของสารที่ต้องการปรับแต่งไม่เพียงพอทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดีเท่าที่ควร กระแสที่ได้มีค่าต่ำเกินไป จากการทดลองนี้พบว่าที่ปริมาตรของสารแขวนลอยที่ 15 ไมโครลิตร ให้ค่ากระแสที่สูงและการหยดลงบนพื้นที่ที่ต้องการปรับแต่งมีความเหมาะสม จึงได้เลือกปริมาตรแขวนลอยเท่ากับ 15 ไมโครลิตร

4.3.7 การศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยา ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

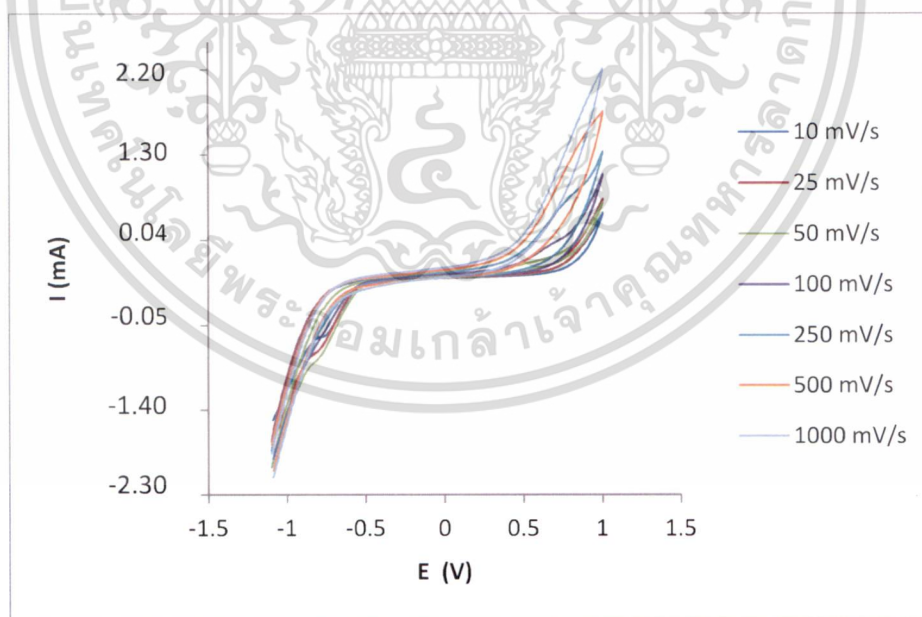
ผลการศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสมของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 10, 25, 50, 100, 250, 500 และ 1000 mV/s จากรูป 4.18 จะพบว่าค่าฟิกระแสดอกซีเดชันจะชัดเจนและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการสแกนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าอัตราการสแกนสูงสุดเท่ากับ 250 mV/s จะทำให้กระแสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความชัดเจนของฟิกระแสดอกซีเดชันจะลดลง ฟิกระแสดอกซีเดชันจะกว้างมากขึ้นและเมื่อนำค่ากระแสที่ได้มาพลอตกับรากที่สองของอัตราการสแกน ($V^{1/2}$) จะได้กราฟเส้นตรงและจากรูปที่ 4.19 เมื่อนำค่า \log ของค่ากระแสมาพลอตกับค่า \log ของอัตราการสแกนพบว่าได้ค่าความชันเท่ากับ 0.502 แสดงว่ากระแสที่ได้เกิดจากกระบวนการ Diffusion-control คือกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปปฏิกิริยาที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นเร็วจนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออนโมเลกุลหรืออนุภาคที่นำไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับไอออนโมเลกุลหรืออนุภาคที่นำไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้จากสมการที่ 4.1

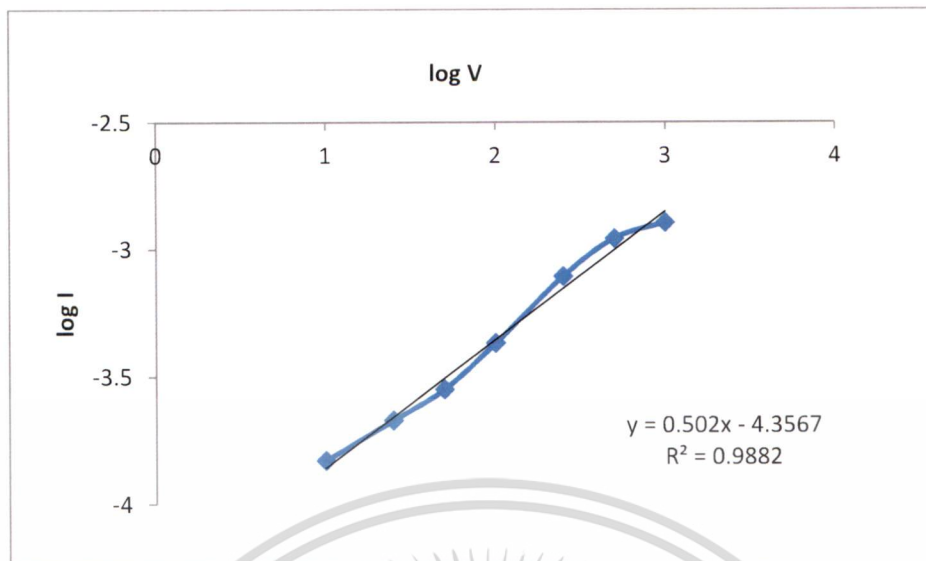
$$i_p = 2.99 \times 10^5 n(\alpha n_e)^{1/2} A C D^{1/2} V^{1/2} \quad (4.1)$$

ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถใช้ค่าอัตราการสแกนในช่วง 10 ถึง 100 mV/s เพราะทำให้กระแสที่ชัดเจนในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



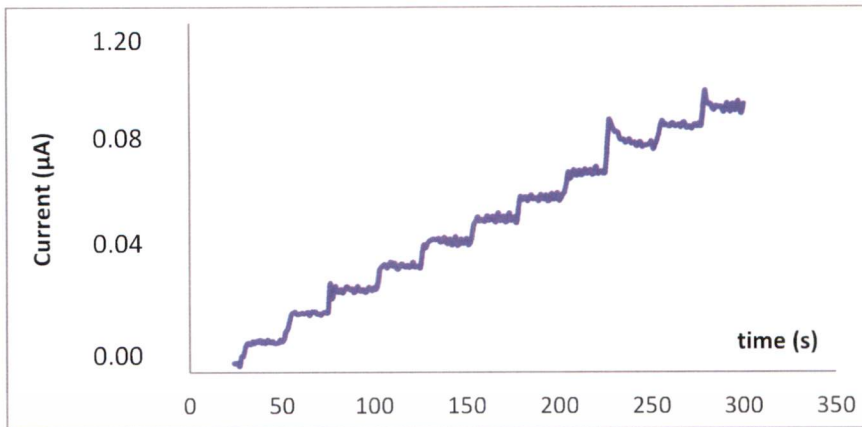
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า \log ของอัตรากระแสแกนกับค่า \log ของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 0.75 โวลต์ ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8

4.3.8 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Linear range)

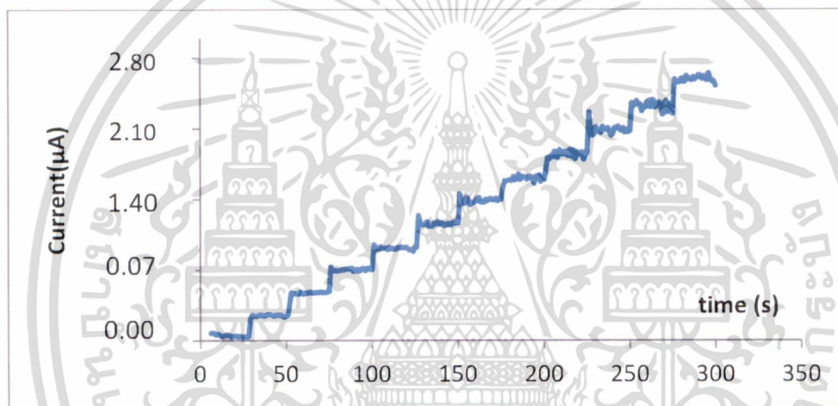
ผลการศึกษาการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยเทคนิคโคร โนแอมเพอโรเมทรี เมื่อพิจารณาไซคลิกโวลแทม โมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ สามารถกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่ให้ปริมาณกระแสสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.75 โวลต์

เมื่อคงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยเทคนิคโคร โนแอมเพอโรเมทรี ได้ผลแอมเพอโรแกรมดังแสดงในรูป 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

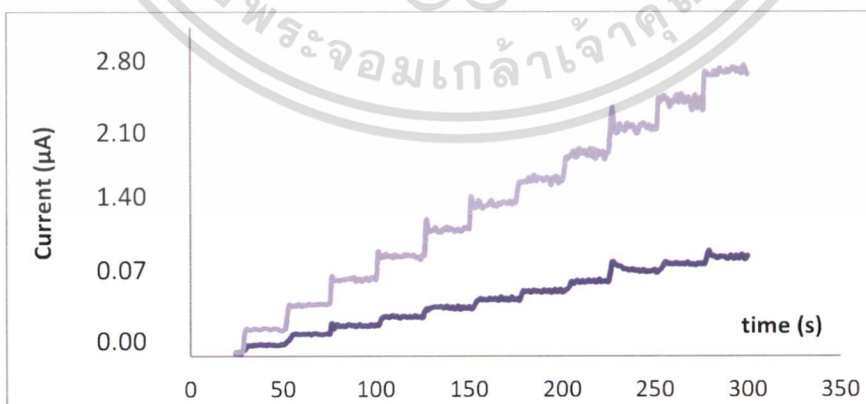
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์



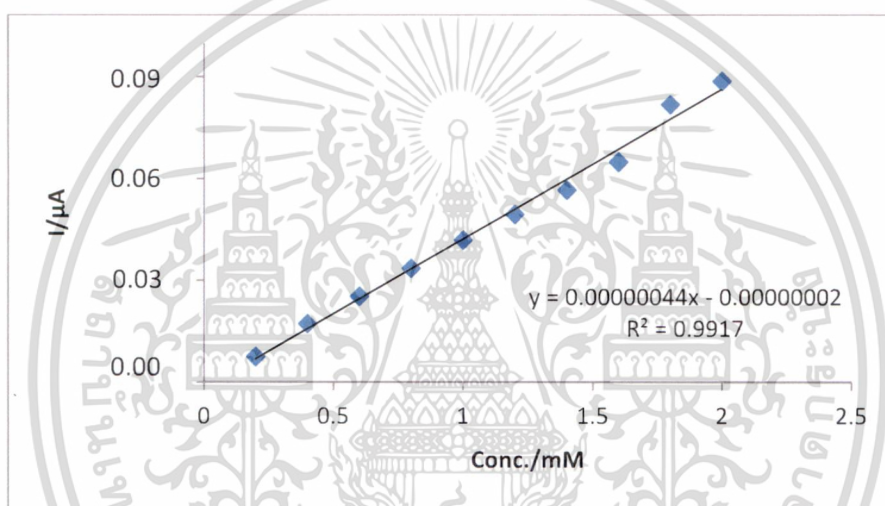
รูปที่ 4.21 แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแอมเพอโรแกรมระหว่างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์กับขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์

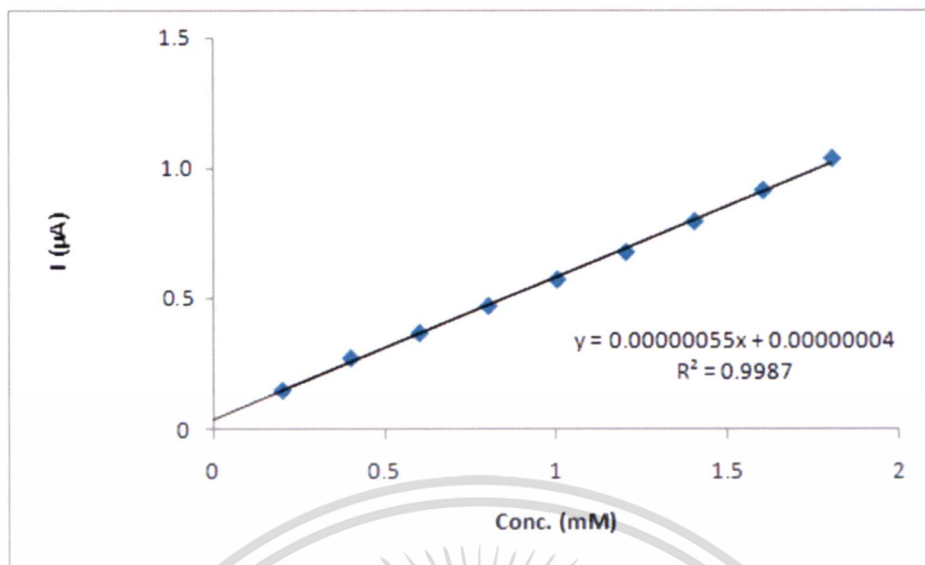
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแอมเพอโรแกรมรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อนำมาพลอตค่าปริมาณกระแสกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเลือกช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟ จะได้ช่วงความเป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในช่วงความเข้มข้น 0.2 ถึง 2.2 มิลลิโมลาร์ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9910 และ 0.9996 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.23 และ 4.24 และจากแอมเพอโรแกรมรูปที่ 4.22 เมื่อนำค่ากระแสที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าค่ากระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแสที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแสที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ปริมาณกระแสและความเป็นเส้นตรงมากกว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการปรับแต่ง

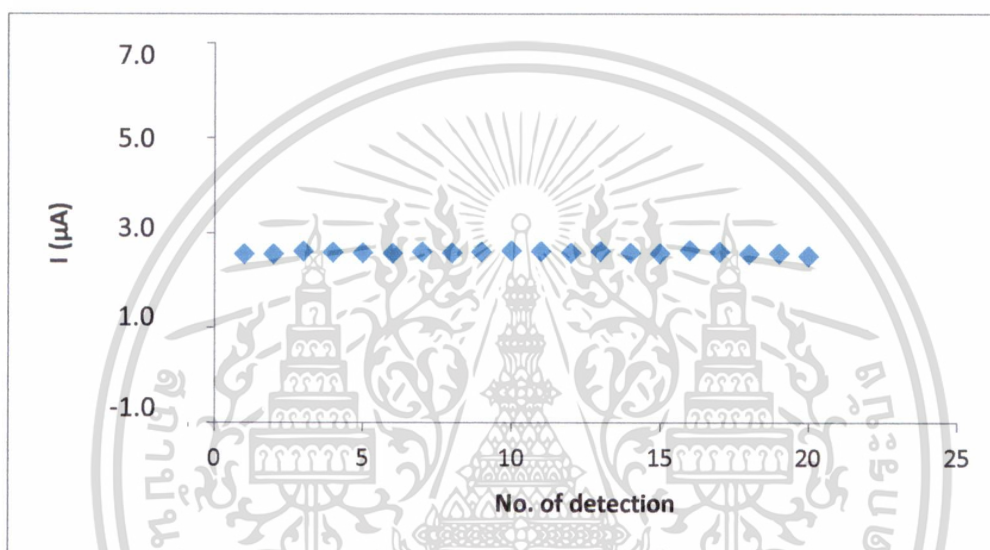
4.3.9 ซีดจำกัดการตรวจวัด

ผลจากการนำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.75 โวลต์ และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณแบบลงศั 20 ครั้งแล้วหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรงจากการทดลองที่ 4.3.8 ไปคำนวณหาค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด ซึ่งให้ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 45.81 ไมโครโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.10 ศึกษาค่าการทำซ้ำ

จากการนำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ด้วยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี 20 ซ้ำ บันทึกค่ากระแสที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แล้วนำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

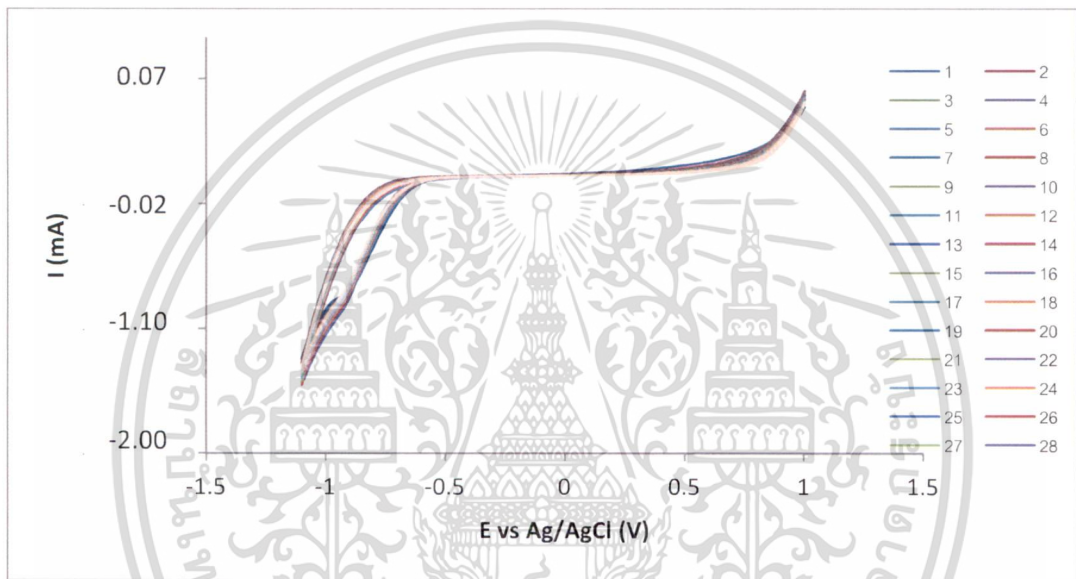


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่ากระแสของการตรวจวัดซ้ำของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

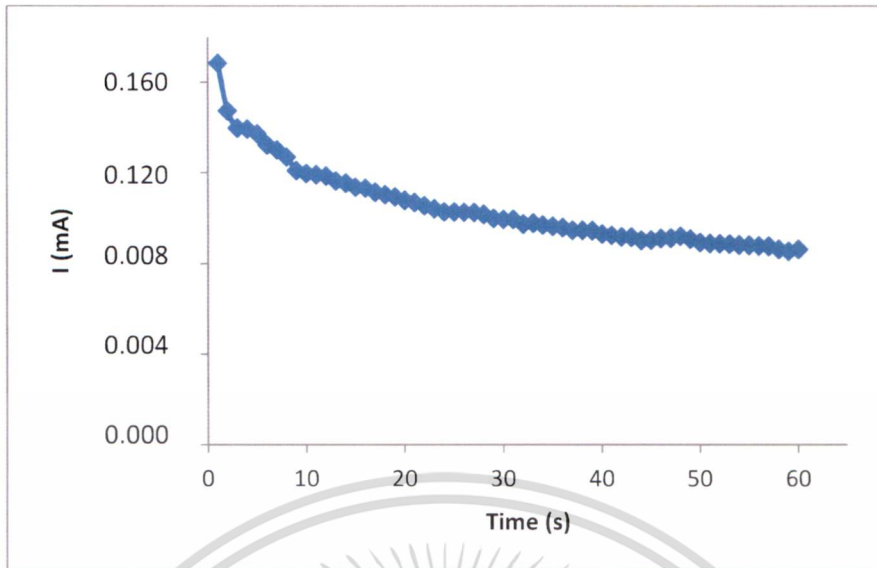
เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

4.3.11 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

จากการนำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.00 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยพิจารณาจากจำนวนรอบของการสแกนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่งของการตรวจวัดครั้งแรกให้ผลดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในแต่ละรอบของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ กับจำนวนรอบของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากกราฟแสดงค่ากระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ ของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่าจำนวนรอบของการสแกนที่กระแสออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีการลดลงในอัตราที่ต่ำ จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ 60 ครั้งหรือมากกว่า เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เกิดการดูดซับบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเมื่อทำการตรวจวัดซ้ำหลายๆ รอบค่ากระแสมีอัตราการลดลงที่ต่ำ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆ ของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

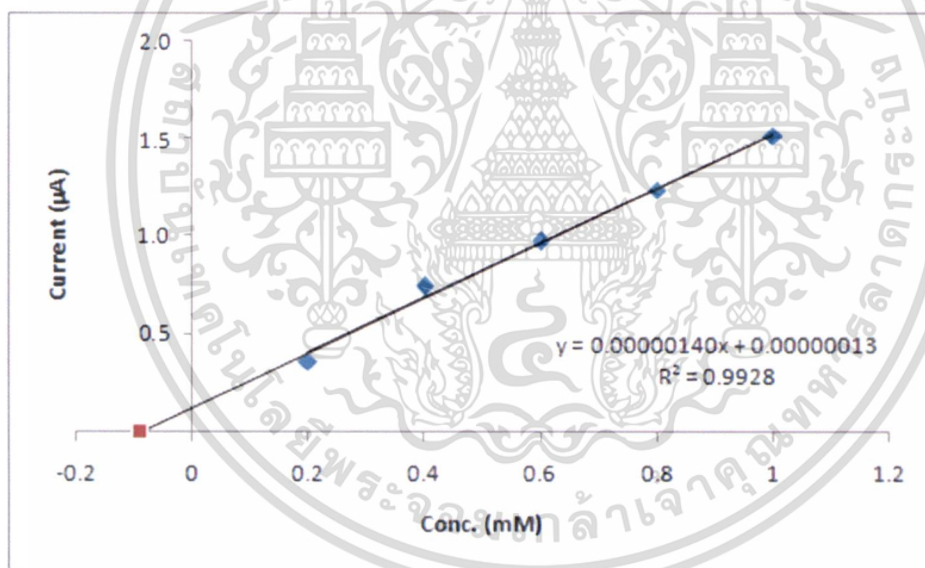
Statistics	FTO electrode	NiO/MWCNT/FTO electrode
Equation	$y = 4 \times 10^{-7} x - 2 \times 10^{-08}$	$y = 5.5 \times 10^{-7} x + 4 \times 10^{-8}$
Linearity	0.2 – 4.2 mM	0.2 – 4.2 mM
R ²	0.9910	0.9987
%RSD*	15.89%	0.658%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
n=20

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

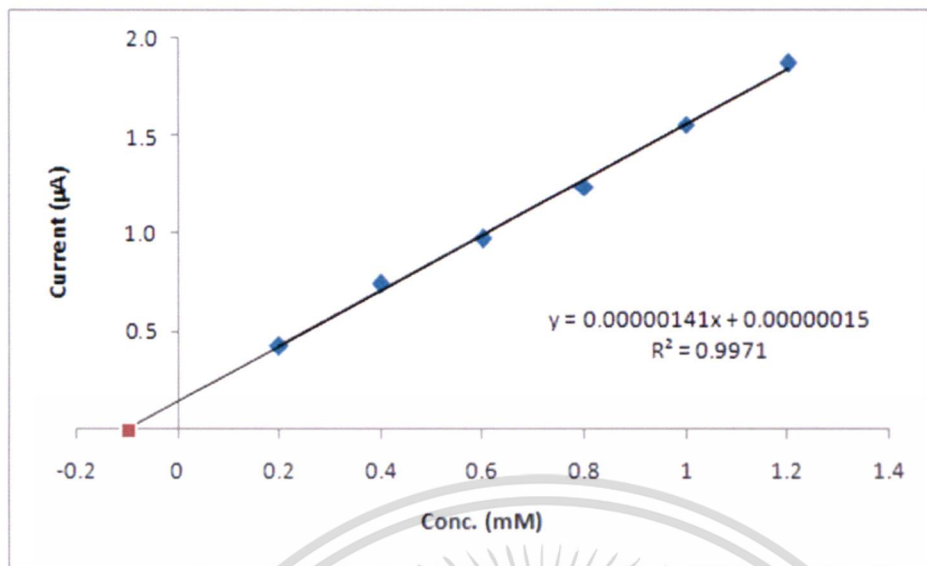
4.4 การประยุกต์ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

การตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลจำนวน 2 ตัวอย่าง และน้ำยาย้อมผม จำนวน 2 ตัวอย่าง เมื่อทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างดังกล่าวในเบื้องต้น พบว่ามีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่าความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ดังนั้นจึงทำการเจือจางสารละลายตัวอย่าง (วิธีการเตรียมสารละลายตัวอย่างแสดงในภาคผนวกซึ่งตามเอกสารกำกับยาของตัวอย่างน้ำยาล้างแผลที่ 1 และ 2 บอกความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 6 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ตามลำดับ ส่วนฉลากข้างขวดของสารตัวอย่างน้ำยาย้อมผมที่ 1 และ 2 บอกความเข้มข้นของสารทั้งหมดเป็น 9 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ระบุว่าเป็นความเข้มข้นของสารใดบ้าง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารตัวอย่างทั้ง 4 ขวด ใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี โดยการเติมสารละลายมาตรฐานลงในสารตัวอย่าง (standard addition method) ความเข้มข้น 0.2 ถึง 2.0 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.75 โวลต์ กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ

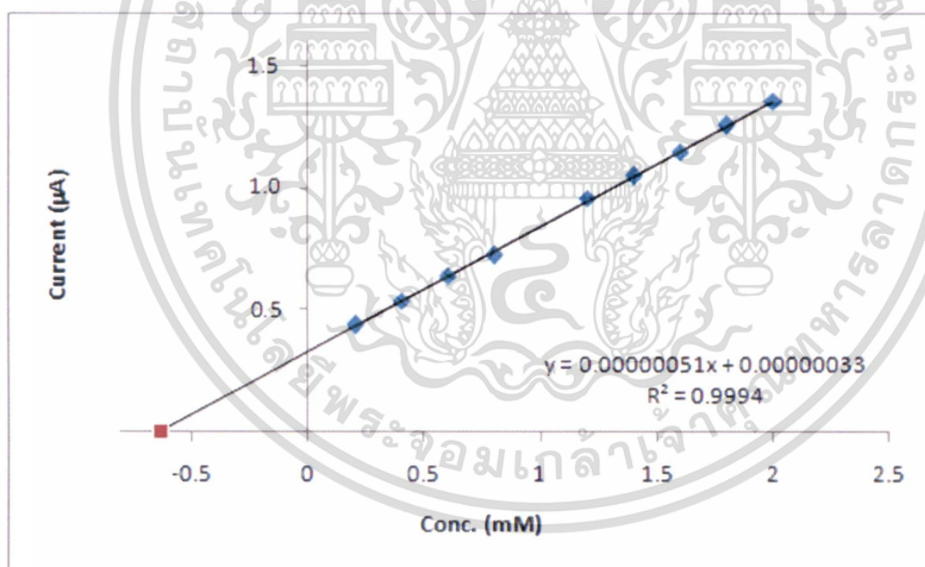


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

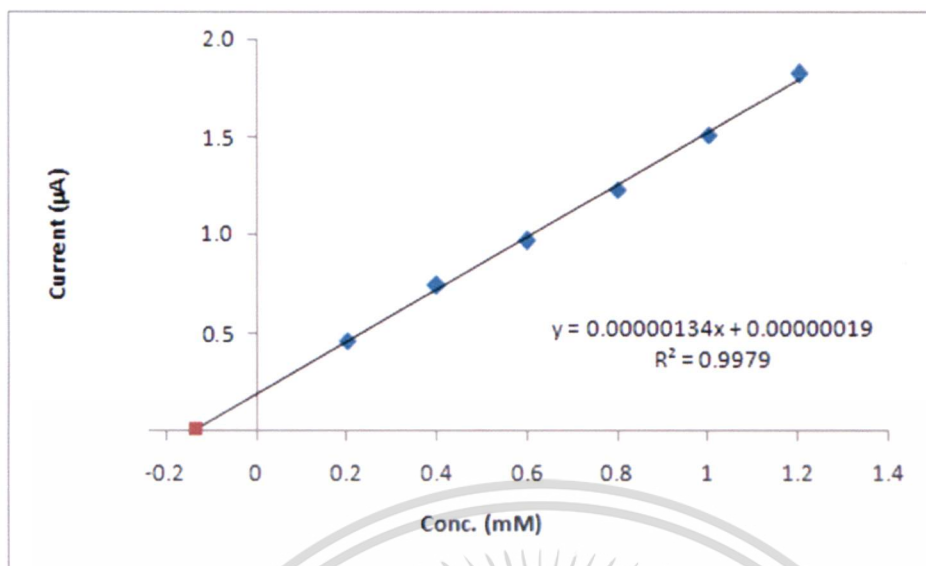


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผล ตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างน้ำยี่ห้ออมม ตัวอย่างที่ 2

จากรูปที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31 เป็นรูปแสดงกราฟของวิธีการเติมสารมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายตัวอย่างที่ไม่ทราบความเข้มข้นแน่นอนของน้ำยี่ห้ออมม ตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตัวอย่างน้ำยี่ห้ออมมที่ 3 และ 4 โดยสามารถหาจุดตัดแกน x มีค่าเท่ากับ -0.092, -0.106, -0.647 และ -0.142 มิลลิโมลาร์ เมื่อกำหนดกลับเพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าน้ำยี่ห้ออมมและน้ำยี่ห้ออมมตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 1.840, 2.120, 3.235 และ 2.836 M ตามลำดับ และจากการคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 6.25, 7.21, 10.99 และ 9.64 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ตามลำดับ

4.5 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับจะพิจารณาจากช่วงการเติมสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.2 ถึง 2.2 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.75 โวลต์

จากค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรีด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยวิธีสร้างกราฟมาตรฐานและคำนวณความเข้มข้นของสารจากสมการเส้นตรง พบว่าค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดน้ำยาล้างแผลและน้ำยาข้อมผมตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ให้ค่าร้อยละของการได้กลับคืนเท่ากับ 105.50, 110.30, 105.00 และ 93.60 ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละของการคืนกลับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ตามมาตรฐานของระบบ AOAC (ความเข้มข้นของตัวอย่างอยู่ในช่วง 2.94×10^{-4} ค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 80-110%)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ปรับแต่งด้วย แนฟฟิออน มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศักย์ไฟฟ้าที่ประมาณ 0.75 โวลต์ และ - 0.75 โวลต์ แต่ขั้วไฟฟ้านิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้กระแสไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากนิกเกิลออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีและยังสามารถเพิ่มพื้นที่หน้าขั้วไฟฟ้าทำให้เกิด Electron transfer reaction ได้ดีขึ้น จากการศึกษา สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี คือใช้ปริมาณของนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของนิกเกิลอะซีเตตในการเตรียมนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 0.2 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายแนฟฟิออนเท่ากับ 0.5% ปริมาตรของสารแขวนลอย(นิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/แนฟฟิออน) เท่ากับ 15 ไมโครลิตร เมื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแล้วนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มาทำการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลาร์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าที่ pH 6.8 ให้ค่ากระแสที่สูงที่สุด เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวได้ดีที่สภาวะดังกล่าว อัตราการสแกนที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 50 mV/s และการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 เป็นกระบวนการเกิดแบบ Diffusion control พบว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 4.2 มิลลิโมลาร์ ($R^2 = 0.9987$) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 45.81 ไมโครโมลาร์ (S/N = 3) และค่าการทำซ้ำเท่ากับ 0.658 (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 60 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการนำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในตัวอย่างน้ำยาล้างแผลและน้ำยาล้างแผลให้ค่าร้อยละของการได้กลับคืนเท่ากับ 105.50, 110.30, 105.00 และ 93.60 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการตรวจวัดด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรีอาจมีกระแสรบกวนจากออกซิเจนในสารละลายดังนั้นควรกำจัดออกซิเจนในสารละลายด้วยการพ่นแก๊สไนโตรเจนก่อนทำการทดลองเพื่อกำจัดออกซิเจน

2. ในการปรับปรุงหน้าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ควรดูว่าการกระจายตัวของสารที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนหน้าขั้วไฟฟ้า หรือไม่ซึ่งการกระจายตัวของสารที่ปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้านั้นอาจมาจากผลของการกระจายตัวของวัสดุผสมในสารละลายแนฟฟิออน

3. เนื่องจากขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ เคลือบบนกระจกซึ่งมีผิวหน้าที่เรียบ ดังนั้นสารที่นำมาปรับแต่งบนหน้าขั้วไฟฟ้าอาจหลุดร่อนได้ดังนั้นในขั้นการเตรียมขั้วไฟฟ้าเมื่อปรับแต่งหน้าขั้วไฟฟ้า แล้วต้องทดสอบการหลุดร่อนของวัสดุที่นำมาปรับแต่ง โดยการแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้แล้วจับเวลาที่วัสดุปรับแต่งนั้นไม่หลุดออกจากขั้วไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dongwon Lee, Sirajud Khaja, Juan C. Velasquez-Castano, Madhuri Dasari, Carrie Sun, John Petros, W.Robert Taylor and Niren. "In vivo imaging of hydrogen peroxide with chemiluminescent nanoparticle" *Nature Material.*, 6, (2007): 765-769.
- [2] Shao Mu and Kan jinqing . "Catalytic activity of dual catalysts system based on nano-manganese oxide and cobalt octacyanophthalocyanine toward four-electron reduction of oxygen in alkaline media". *Electrochimica Acta.*, 4, (1995): 241-246.
- [3] P.A.Tanner and A.Y.S.Wong. "Spectrophotometric determination of hydrogen peroxide in rain water". *Analitica Chimica Acta* , 370, (1998) : 279-287.
- [4] M.R. Guascito, E. Filippo, C. Malitesta, D. Manno, A. Serra, A. Turco. " A new amperometric nanostructured sensor for the analytical determination of hydrogen ". *Biosensor and Bioelectronics.*, 24, (2008): 1057-1063.
- [5] Vanesa Sanz, Susana de Marcos, Javier. "Hydrogen peroxide and peracetic acid determination in waste water using a reversible reagentless biosensor" *Analytica Chimica Acta.*,583,(2007) : 332-339.
- [6] Chuan-Liang Hsu, Ku-Shang Chang, Ju-Chia Kuo "Determination of hydrogen peroxide residues in aseptically packaged beverages using an amperometric sensor based on a palladium electrode" *Food Control.*,19(2008) : 223-230
- [7] M. Somasundrum, K. Kirtikara, M. Tanticharoen. "Amperometric determination of hydrogen peroxide by direct and catalytic reduction at a copper electrode." *Analytica Chimica Acta.*,319,(1996):59-70
- [8] Antonio Doménech and Javier Alarcón. "Determination of hydrogen peroxide using glassy carbon and graphite/polyester composite electrodes modified by vanadium-doped zirconias" *Analytica Chimica Acta.*,452, (2002) : 11-22
- [9] Gendi Jin, Shi Du and Xiaoya Hu. "The potentiometric determination of peroxide hydrogen and glucose on the glassy electrode modified by the calix[4]arene" *Talanta.*, 80, (2009) : 858-863
- [10] Noriyoshi Masuoka, Masahiro Wakimoto, Toshihiko Ubuka and Taku Nakano "Spectrophotometric determination of hydrogen peroxide: catalase activity and rates of hydrogen peroxide removal by erythrocytes." *Clinica Chimica Acta.*, 254, (1996): 101-112
- [11] Akio Sakuragawa, Tetsuyuki Taniai and Tadao Okutani. "Fluorometric determination of microamounts of hydrogen peroxide with an immobilized enzyme prepared by coupling horseradish

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- peroxidase to chitosan beads.” *Analytica Chimica Acta.*, 374, (1998): 191-200
- [12] Bo Tang and Yan Wang “Spectrofluorimetric determination of both hydrogen peroxide and ---O---O---H in polyethylene glycols (PEGs) using 2-hydroxy-1-naphthaldehyde thiosemicarbazone (HNT) as the substrate for horseradish peroxidase (HRP).” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.*, 59, (2003) : 2867-2874
- [13] Hongqi Chen, Hupeng Yu, Yunyou Zhou and Lun Wang “Fluorescent quenching method for determination of trace hydrogen peroxide in rain water” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.*, 67,(2007) : 683-686
- [14] M.E. Abbas, Wei Luo, Lihua Zhu, Jing Zou and Heqing Tang. “Fluorometric determination of hydrogen peroxide in milk by using a Fenton reaction system” *Food Chemistry.*, 120, (2010):327-331
- [15] Guo-Jun Zhou, Gang Wang, Jing-Juan Xu and Hong-Yuan Chen. “Reagentless chemiluminescence biosensor for determination of hydrogen peroxide based on the immobilization of horseradish peroxidase on biocompatible chitosan membrane” *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 81, (2002) : 334-339
- [16] Azra Tahirović, Amira Čopra, Enisa Omanović-Miklićanin and Kurt Kalcher. “A chemiluminescence sensor for the determination of hydrogen peroxide” *Talanta.*, 72,(2007) : 1378-1385
- [17] S.V. Aurobind, K.P. Amirthalingam and H. Gomathi. “Sol-gel based surface modification of electrodes for electro analysis”. *Adv. Colloid Interf Sci.*, 121, (2006): 1-7.
- [18] D. Zhang, D. Chi, T. Okajima and T. Ohsaka. “Catalytic activity of dual catalysts system based on nano-manganese oxide and cobalt octacyanophthalocyanine toward four - electron reduction of oxygen in alkaline media”. *Electrochim. Acta.*, 52, (2007): 5400-5406.
- [19] R.J. Collins and C.N. Sukenik. “Sulfonate-functionalized siloxane-anchored selfassembled monolayers”. *Langmuir*, 11, (1995) 2322-2324.
- [20] X.-M. Miao, R. Yuan, Y.-Q. Chai, Y.-T. Shi and Y.-Y. Yuan. “Direct electrocatalytic reduction of hydrogen peroxide based on Nafion and copper oxide nanoparticles modified Pt electrode”. *J. Electroanal. Chem.*, 612, (2008): 157-163.
- [21] C. Batchelor-McAuley, Y. Du, G.G. Wildgoose and R.G. Compton. “The use of copper (II) oxide nanorod bundles for the non-enzymatic voltammetric sensing of carbohydrates and hydrogen peroxide”. *Sens. Actuators B: Chem.*, 135, (2008): 230-235.
- [22] Wikimedia the free encyclomedia. Nickel. [Online] Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Last update: April, 7 2011.

- [23] RMUT., Nickel rare. [Online] Available: http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/science/TI2nic_D.htm search: April, 7 2011.
- [24] Wikimedia the free encyclopedia. Nickel Oxide. [Online] Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_oxide; Last update: April, 7 2011.
- [25] T. srithawong, S. Chawadech, S. ngamsinlapawichian and Suzumu Yochikawa “A modified sol-gel process-derived highly nanocrystalline mesoporous NiO with narrowpore size distribution” Research Chula.(2007)
- [26] Jun-Wei Sue, Hig-Hui Ku, Hsieh-Hsun Chung and Jyh-Myng Zen. “Disposable screen- printed ring disk carbon electrode coupled with wall-jet electrogenerated iodine for flew injection analysis of arsenic (III)”. Electrochemistry Communications, Vol.10, (2008): 987-990.
- [27] Chi-Ming and Chung-kwong Poon. “Redox properties of tetraza-macrocycles of iron, ruthenium and osmium”. Pure&Appl., Vol.60, (1988): 495-500.
- [28] W.Phoohinkong. “Screen-printed electrode modified with nano-ZnO dispersed on polyaniline nanowires biosensor for determination of hydrogen peroxide”. Master of Science. Bangkok:King Mongkut’s Institute Of Technology Ladkrabang, 2010.
- [29] Shanshan Wu, Shuai Yuan, Liyi Shi, Yin Zhao and Jianhui Fang. “Preparation, characterization and electrical properties of fluorine-doped tin dioxide nanocrystals”. J. Colloid and Interface Science., 346, (2010): 12–16.
- [30] Mahidol University. Carbonnanoube. [online] Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit3-7.html> Last update : April ,7 2011.
- [31] Wikimedia the free encyclopedia. Carbonnanoube. [online] Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbonnanoube> ; Last update : April ,7 2011.
- [32] Wikimedia the free encyclopedia. Nafion. [online] Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion> ; Last update : April ,7 2011.
- [33] J. Wang. Analytical Electrochemistry. 2nd ed. New York: Wiley-VCH. (2000): 32-33, 100-107.
- [34] Skoog D.A. and Leary J.J. Principle and Applications of Electrochemistry. 4thed. Fort Worth: Saunder College. (1992): 535-564.
- [35] Abdollah Noorbakhsh and Abdollah Salimi “Amperometric detection of hydrogen peroxide at nano-nickel oxide/thionine ang Celestine blue nanocomposite – modified glassy carbon electrode”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Electrochimica Acta., 54,(2009) : 6312-6321.
- [36] Rike Yudianti, Lucia Indrati and Holia Onggo. “Thermal behavior of purified multi walled carbon nanotube” J.applied sciences., 10,(2010) : 1978-1982.
- [37] Ying Liu, Hong Teng, Haoqing Hou and Tianyan You. “Nonenzymetic glucose sensor based on renewable electrospun Ni nanoparticle-loaded carbon nanofiber paste electrode” Biosensor and Bioelectronics.,24(2009) : 3329-3334.
- [38] N.Dharmaraj, P.Prabu, S. Nagarajan, C.H.Kim, J.H. Park and H.Y.Kim “Synthesis of nickel oxide nanoparticle using nickel acetate and poly(vinyl acetate) precursor” Material science and engineering B.,128,(2006) : 111-114.
- [39] Vijaykumar Ijeri, Lucandrea Cappellto, Stefano Biabco, Mauro Tortello, Paolo Spinelli and Elena Tresso “Nafion and carbon nanotube nanocomposites for mixed proton and electron conduction” J.Membrane science.,(2010).
- [40] Mojtaba Shansipur, Mostafa Najafi and Mohammad-Reza Milani Hosseini “Highly improved electrooxidation of glucose at a nickel (II) oxide/multiwalled carbon nanotube modified glassy carbon electrode” Bioelectrochemistry., 77 (2010) : 120-124.
- [41] V. Mucka, J.Podlaha and R. Silber “NiO-ThO mixed catalysts in hydrogenperoxide decomposition and influence of ionizing radiation” Radiation Physics and Chemistry.,52(2000) : 467-475.
- [42] Ji Yeong Lee, Kui Liang, Kay Hyeok An and Young Hee Lee. “Nickel oxide/carbon nanotube nanocomposite for electrochemical capacitance” Synthesis metal.,150 (2005) : 153-157.
- [43] Peng Wang, Shengqi Li and Jinqing Kana. “A hydrogen peroxide biosensor based on polyaniline/FTO”. Sensors and Actuators B, 137, (2009): 662–668.
- [44] Wei Zhao, Huicai Wang, Xia Qin, Xinsheng Wang, Zixia Zhao, Zhiying Miao, Lili Chen, Miaomiao Shan, Yuxin Fang and Qiang Chen. “A novel nonenzymatic hydrogen peroxide sensor based on multi-wall carbon nanotube/silver nanoparticle nanohybrids modified gold electrode”. Talanta. 80, (2009): 1029–1033.
- [45] Xinhuan Kang, Zhibin Mai, Xiaoyong Zou, Peixiang Cai and Jinyuan Mo. “A sensitive nonenzymatic glucose sensor in alkaline media with a copper nanocluster/multiwall carbon nanotube-modified glassy carbon electrode”. Analytical Biochemistry, 363, (2007): 143–150.
- [46] Kuei-Sheng Tseng, Lin-Chi Chen and Kuo-Chuan Ho. “Amperometric detection of hydrogen peroxide at a Prussian Blue-modified FTO electrode”. Sensors and Actuators B, 108, (2005): 738–745.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] Po-Hsun Lo, S. Ashok Kumar and Shen-Ming Chen. "Amperometric determination of H_2O_2 at nano- TiO_2 /DNA/thionin nanocomposite modified electrode". *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 66, (2008): 266–273.
- [48] Carmen Quintana, Pedro Atienzar, Gerolamo Budroni, Laura Mora, Lucas Hernández, Hermenegildo García and Avelino Corma. "Development and characterization of fluorine tin oxide electrodes modified with high area porous thin films containing gold nanoparticles". *Thin Solid Films*, 519, (2010): 487–493.
- [49] Chia-Yu Lina, Yi-Hsuan Lai, A. Balamurugana, R. Vittal, Chii-Wann Linb and Kuo-Chuan Ho. "Electrode modified with a composite film of ZnO nanorods and Ag nanoparticles as a sensor for hydrogen peroxide". *Talanta*, 82, (2010): 340–347.
- [50] Yali Li, Jia Zhang, Hui Zhu, Fan Yang and Xiurong Yang. "Gold nanoparticles mediate the assembly of manganese dioxide nanoparticles for H_2O_2 amperometric sensing". *Electrochimica Acta*, 55, (2010): 5123–5128.
- [51] K.K. Purushothaman, M. Dhanashankar and G. Muralidharan. "Preparation and characterization of F doped SnO_2 films and electrochromic properties of FTO/NiO films". *Current Applied Physics*, 9, (2009): 67–72.
- [52] Bard A.J. and Faulkner L.R. *Electrochemical Methods: Fundamental and Application*. 2nd ed. New York: John Wiley&Sons. (2001): 236.
- [53] P.Woointranont, R. Noonuruk, B. jandai, S. Chaiyasith and W. Petcharapa. "Microwave-assisted synthesis of NiO/CNTs nanoparticles for functional electrochemical working electrode" *GMSTEC*, (2010)
- [54] J. Wang. *Analytical Electrochemistry*. 2nd ed. New York: Wiley-VCH. (2000): 32-33, 100-107.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.863 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.2 การเตรียมสารละลายนิกเกิลอะซีเตต (Ni (CH₃COO)₂) 0.20 โมลาร์

ชั่งนิกเกิลอะซีเตตเตตระไฮเดรต (Ni (CH₃COO)₂·4H₂O) 4.97 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายนิกเกิลอะซีเตตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.20 โมลาร์

ก.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.10 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายในน้ำกลั่นปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.4 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.10 โมลาร์

ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12.06 โมลาร์ มา 417 ไมโครลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.5 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 18.637 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.00 โมลาร์

ก.6 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรตความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรต 0.494 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ จะได้สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรตความเข้มข้น 30.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ก.7 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2)

เนื่องจากในขวดของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 30% (w/v)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 30 กรัม

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 300 กรัม

มวลโมเลกุลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 34.02 กรัม/โมล

ดังนั้น จะได้ว่าจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ $\frac{300}{34.02}$ โมลต่อลิตร

เท่ากับ 8.82 โมลาร์

การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

จากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (8.82 โมลาร์)

V_1 ปริมาตรของสารที่ต้องแบ่งมาใช้ในการเตรียม (25 มิลลิลิตร)

C_2 เป็นความเข้มข้นที่ต้องการเตรียม (100 มิลลิโมลาร์)

V_2 ปริมาตรที่ต้องการเตรียม

จากสมการจะได้ว่า

$$8.82 \text{ M} \times V_1 = 0.100 \text{ M} \times 25 \text{ ml}$$

$$V_1 = 0.283 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่าเมื่อต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์จะต้อง ปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 283 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การเตรียมสารละลายไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 1.00 โมลาร์

ชั่ง ไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 22.823 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจะได้สารละลายไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ข.2 การเตรียมสารละลายไดไฮโดรเจนโพแทสเซียมฟอสเฟต 1.00 โมลาร์

ชั่ง ไดไฮโดรเจนโพแทสเซียมฟอสเฟต 11.609 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจะได้สารละลายไดไฮโดรเจนโพแทสเซียมฟอสเฟตความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ข. 3 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ ที่ pH ต่างๆ จะทำการเปิดสารละลาย 2 ชนิด ปริมาณแตกต่างกัน แสดงปริมาณที่ใช้ในตาราง ข.1 จากนั้นนำสารละลาย ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจะได้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ตาราง ข.1 แสดงอัตราส่วนผสมเพื่อปรับค่า pH ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

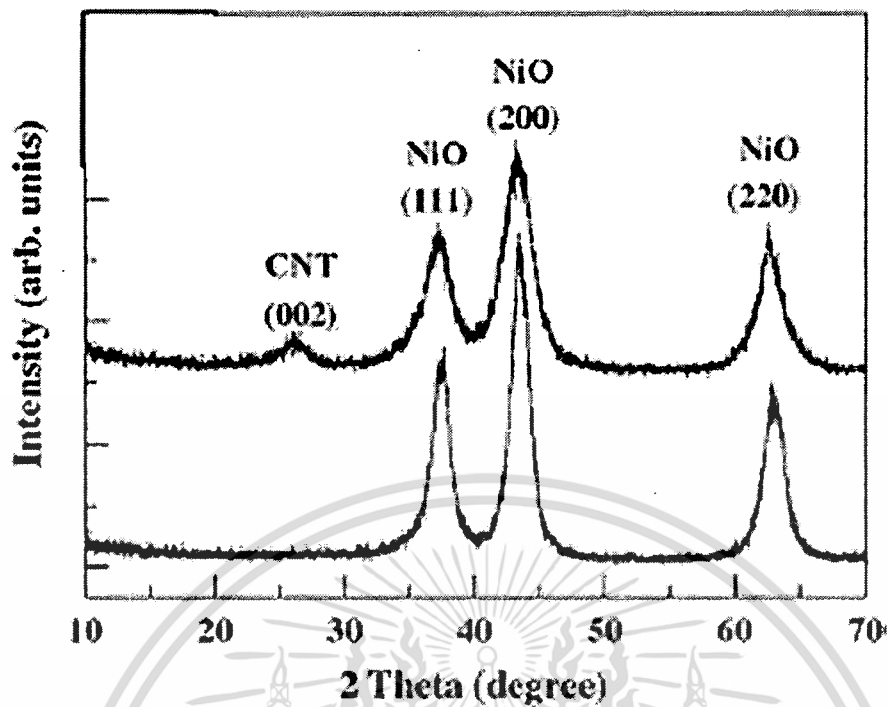
pH	ปริมาณสารละลาย	
	ไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 โมลาร์	ไดไฮโดรเจนโพแทสเซียมฟอสเฟต 1 โมลาร์
5.80	4.00	46.00
6.00	6.15	43.85
6.20	9.25	40.75
6.50	13.25	36.75
6.70	18.75	31.25
7.00	30.50	19.50
7.20	36.00	14.00
7.40	40.50	9.50
7.60	43.50	6.50
7.80	45.75	4.25
8.00	47.35	2.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
พีทของ นิกเกิลออกไซด์/คาร์บอนนาโนทิวบ์ จากเทคนิค X-Ray Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 พีคของนิกเกิลออกไซด์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากเทคนิค X-Ray Diffraction [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\



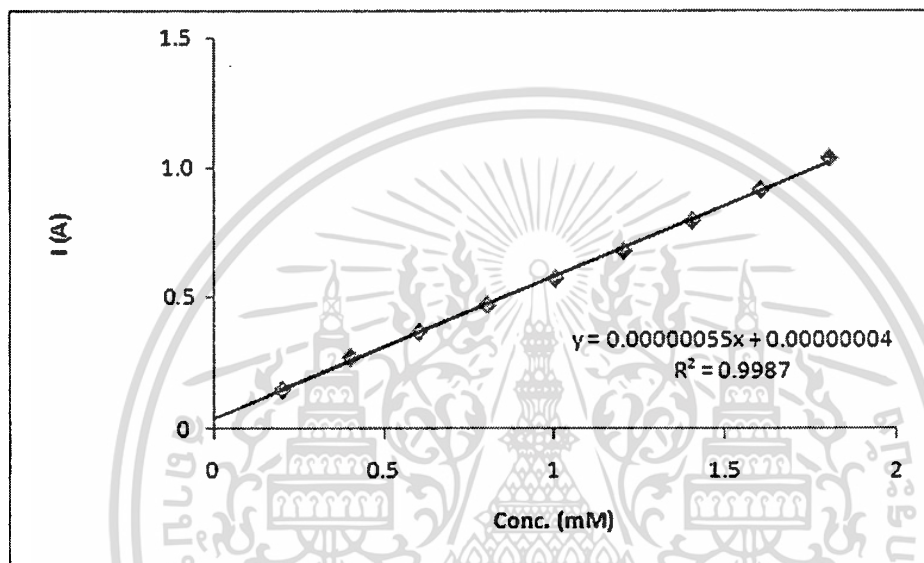
ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าธรรมเนียมของการคืนกลับของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงการคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำยาล้างแผลตัวอย่างที่ 1

จากการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำยาล้างแผลตัวอย่างที่ 1 โดยใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทิน ออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี ใช้ ศักย์ไฟฟ้าคงที่ +0.75 โวลต์ จะ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ

ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้จากสมการ

$$\% \text{Recovery} = \frac{C_{\text{spiked sample}} - C_{\text{sample}}}{C_{\text{standard}}} \times 100$$

$C_{\text{spiked sample}}$ = ความเข้มข้นของ spiked sample

C_{sample} = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

C_{standard} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการสร้างกราฟมาตรฐานได้ค่าความเข้มข้นของสาร spiked sample เท่ากับ 0.720 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 0.159 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมเท่ากับ 0.6 มิลลิโมลาร์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \% \text{Recovery} &= \frac{0.792 - 0.159}{0.6} \times 100 \\ &= 105.5\% \end{aligned}$$

ค่าร้อยละของการคืนกลับของสารละลายตัวอย่างอื่นๆ หาได้จากสมการเดียวกันนี้ดังแสดงในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 แสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ

สารตัวอย่างที่	ความเข้มข้นของ spike sample (mM)	ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง(mM)	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม (mM)	ค่าร้อยละของการคืนกลับ(%)
1	0.792	0.159	0.6	105.50
2	0.770	0.108	0.6	110.30
3	1.315	0.876	0.6	105.00
4	0.685	0.314	0.6	93.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.1 ตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับที่เป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC

ความเข้มข้นของสารที่ทำการวิเคราะห์	ความเข้มข้นของสารที่ทำการวิเคราะห์	ค่าร้อยละของการคืนกลับ
100%	2.94×10^1	98-102
> 10%	2.94×10^0	98-102
> 1%	2.94×10^{-1}	97-103
> 0.1%	2.94×10^{-2}	95-105
100 ppm	2.94×10^{-3}	90-107
10 ppm	2.94×10^{-4}	80-110
1 ppm	2.94×10^{-5}	80-110
100 ppb	2.94×10^{-6}	80-110
10 ppb	2.94×10^{-7}	60-115
1 ppb	2.94×10^{-8}	40-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.1 แสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าข้าวด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการตรวจวัดด้วยข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าข้าวด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อศึกษาผลของช่วงความเป็นเส้นตรงในกราฟรูปที่ (4.21) จะได้สมการเส้นตรงและค่า R^2 ดังนี้

$$y = 5.5 \times 10^{-7} X - 4 \times 10^{-8}$$

$$R^2 = 0.9987$$

จากสมการเส้นตรงสามารถคำนวณหาขีดจำกัดการตรวจวัดได้ โดยค่าในการคำนวณแสดงดังตาราง ฉ.1

ตารางที่ ฉ.1 ตารางแสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดของข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าข้าวด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยทำการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ครั้งที่	y_i	\bar{y}	$y_i - \bar{y}$
1	2.88×10^{-7}	2.38×10^{-7}	5.09×10^{-8}
2	2.76×10^{-7}	2.38×10^{-7}	3.84×10^{-8}
3	2.69×10^{-7}	2.38×10^{-7}	3.14×10^{-8}
4	2.60×10^{-7}	2.38×10^{-7}	2.25×10^{-8}
5	2.47×10^{-7}	2.38×10^{-7}	9.10×10^{-9}
6	2.48×10^{-7}	2.38×10^{-7}	1.03×10^{-8}
7	2.38×10^{-7}	2.38×10^{-7}	2.00×10^{-10}
8	2.26×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.20×10^{-8}
9	2.30×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-7.10×10^{-9}
10	2.37×10^{-7}	2.38×10^{-7}	1.01×10^{-8}
11	2.30×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-6.80×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	y_i	\bar{y}	$y_i - \bar{y}$
12	2.27×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.01×10^{-8}
13	2.31×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-6.80×10^{-8}
14	2.27×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.08×10^{-8}
15	2.23×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.41×10^{-8}
16	2.25×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.23×10^{-9}
17	2.21×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-1.66×10^{-8}
18	2.16×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-2.11×10^{-8}
19	2.17×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-2.00×10^{-9}
20	2.15×10^{-7}	2.38×10^{-7}	-2.77×10^{-8}

จากตารางที่ จ.1 เมื่อได้ค่าผลรวมของความแตกต่างของกระแสจากการตรวจวัดและกระแสจากสมการเส้นตรงยกกำลังสอง จะนำค่าผลรวมมาคำนวณหาค่า SD และค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) จากสมการ

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

$$SD = 2.03 \times 10^{-8}$$

$$3SD = 6.10 \times 10^{-8}$$

จากนั้นจะนำค่า $3S_{xy}$ มาแทนค่า y ในสมการเส้นตรง

$$6.10 \times 10^{-8} = 5.5 \times 10^{-7} X - 4 \times 10^{-8}$$

$$X = 4.581 \times 10^{-5} \text{ โมลาร์}$$

ดังนั้นขีดจำกัดการตรวจวัดของข้าวไฟฟ้าข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์สามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในฟอสเฟตบัพเฟอร์ 0.10 โมลาร์ ได้ต่ำสุดที่ความเข้มข้น 45.81 ไมโครโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.1 แสดงการคำนวณค่าความเที่ยงของวิธีในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ ขี้ไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขี้ด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการตรวจวัดด้วยขี้ไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งหน้าขี้ด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อศึกษาผลของช่วงความเป็นเส้นตรงในกราฟรูปที่ (4.21) จะได้สมการเส้นตรงและค่า R^2 ดังนี้

$$y = 5.5 \times 10^{-7} X - 4 \times 10^{-8}$$

$$R^2 = 0.9987$$

จากสมการเส้นตรงสามารถคำนวณหาค่าความเที่ยงของวิธี โดยค่าในการคำนวณแสดงดังตาราง ช.1

ตารางที่ ช.1 ตารางแสดงการคำนวณค่าความเที่ยงในการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขี้ไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ ที่ปรับแต่งหน้าขี้ด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยทำการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.8 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ครั้งที่	y_i	\bar{y}	$y_i - \bar{y}$
1	7.25×10^{-7}	7.26×10^{-7}	-9.00×10^{-10}
2	7.22×10^{-7}	7.26×10^{-7}	-3.90×10^{-9}
3	7.34×10^{-7}	7.26×10^{-7}	7.60×10^{-9}
4	7.30×10^{-7}	7.26×10^{-7}	3.70×10^{-9}
5	7.33×10^{-7}	7.26×10^{-7}	6.40×10^{-9}
6	7.31×10^{-7}	7.26×10^{-7}	4.30×10^{-9}
7	7.34×10^{-7}	7.26×10^{-7}	7.60×10^{-9}
8	7.31×10^{-7}	7.26×10^{-7}	4.30×10^{-9}
9	7.25×10^{-7}	7.26×10^{-7}	-9.00×10^{-9}
10	7.33×10^{-7}	7.26×10^{-7}	6.70×10^{-10}
11	7.29×10^{-7}	7.26×10^{-7}	2.20×10^{-9}

ครั้งที่	y_i	\bar{y}	$y_i - \bar{y}$
12	7.33×10^{-7}	7.26×10^{-7}	6.40×10^{-8}
13	7.34×10^{-7}	7.26×10^{-7}	7.30×10^{-8}
14	7.32×10^{-7}	7.26×10^{-7}	5.80×10^{-8}
15	7.33×10^{-7}	7.26×10^{-7}	7.00×10^{-8}
16	7.32×10^{-7}	7.26×10^{-7}	5.20×10^{-9}
17	7.33×10^{-7}	7.26×10^{-7}	6.40×10^{-8}
18	7.23×10^{-7}	7.26×10^{-7}	-3.00×10^{-8}
19	7.16×10^{-7}	7.26×10^{-7}	-1.00×10^{-9}
20	7.27×10^{-7}	7.26×10^{-7}	3.00×10^{-10}

จากตารางที่ ข.1 เมื่อได้ค่าผลรวมของความแตกต่างของกระแสจากการตรวจวัดและกระแสจากสมการเส้นตรงยกกำลังสอง จะนำค่าผลรวมมาคำนวณหาค่า SD และค่าความเที่ยง (% RSD) จากสมการ

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

$$SD = 4.80 \times 10^{-9}$$

$$\bar{X} = 7.29 \times 10^{-7}$$

จากนั้นแทนค่าในสมการ

$$\%RSD = \frac{4.80 \times 10^{-9}}{7.29 \times 10^{-7}} \times 100$$

$$\%RSD = 0.652\% \text{ โมลาร์}$$

ดังนั้น ค่าความเที่ยงของการใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยนิกเกิลออกไซด์/มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าความเที่ยง (%RSD) เท่ากับ 0.652 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายบุญส่ง จันทร์ไค
วัน เดือน ปีเกิด 17 ตุลาคม 2524
ที่อยู่ 49 หมู่ที่ 2 ตำบลสามแยก อำเภอเลิงนกทา จังหวัดยโสธร
ประวัติการศึกษา ประกาศนียบัตรบัณฑิต วิชาชีพรู คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม พ.ศ. 2549
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี พ.ศ. 2547
ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเลิงนกทา พ.ศ. 2542
ประวัติการทำงาน รับราชการครู คศ.1. โรงเรียนบ้านพอกโนนหนองผือคำไผ่ใต้ ตำบลคำไผ่ อำเภอไทยเจริญ จังหวัดยโสธร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้